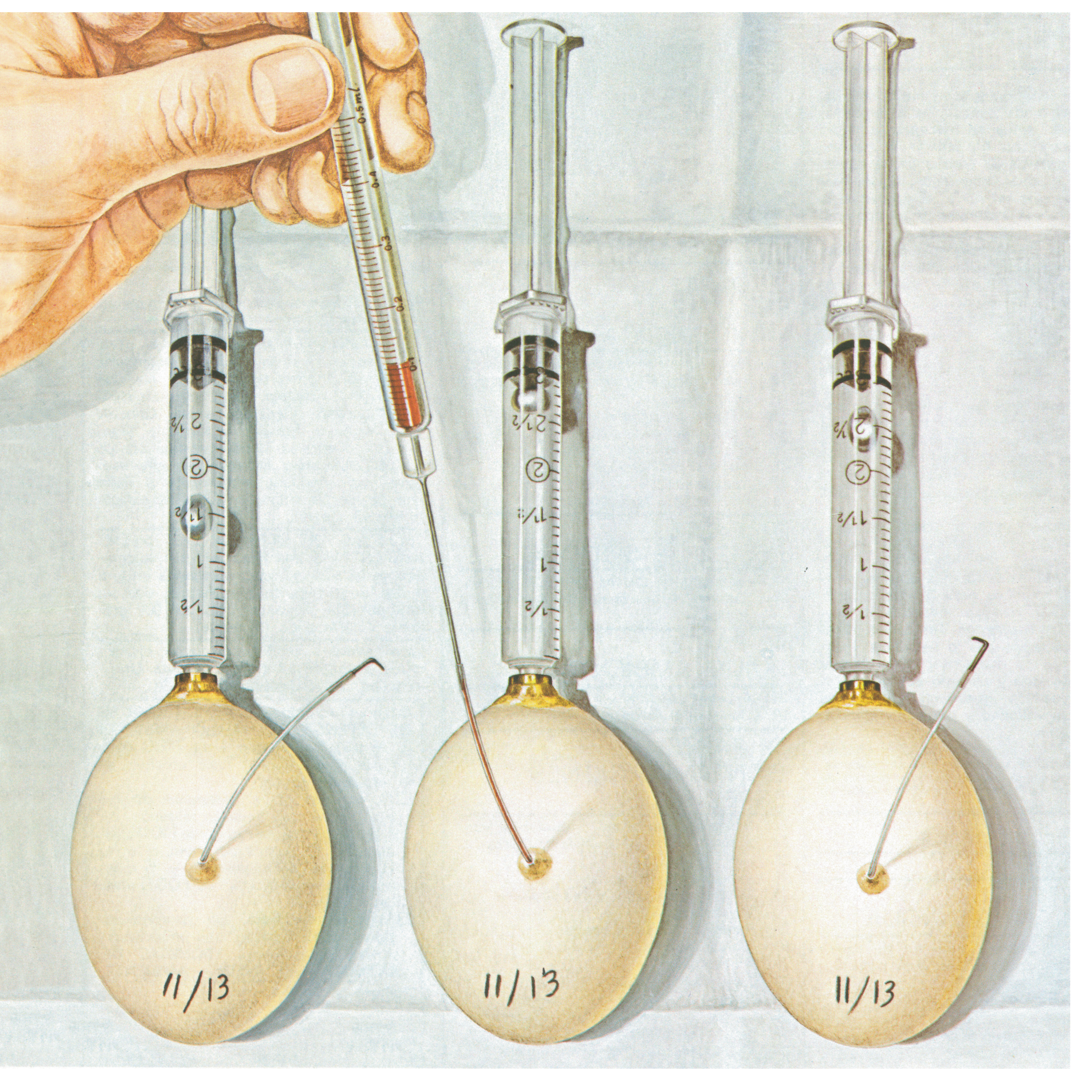
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



COMO RESPIRAN LOS HUEVOS DE LAS AVES

Abril 1979

170 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 31
Abril 1979



SCIENTIFIC AMERICAN

COMITE DE REDACCION Gerard Piel (Presidente); Dennis Flanagan, Francis Bello, Philip Morrison; Trudy E. Bell; Judith Friedman; Brian P. Hayes; Jonathan B. Piel; John Purcell; James T. Rogers; Armand Schwab, Jr.; Jonathan B. Tucker; Joseph Wisnovsky

DIRECCION EDITORIAL Dennis Flanagan
DIRECCION ARTISTICA Samuel L. Howard
PRODUCCION Richard Sasso
DIRECTOR GENERAL Donald H. Miller, Jr.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR Francisco Gracia Guillén
REDACCION José María Valderas Gallardo (Redactor Jefe)
Encarna de Blas (Secretaria de Redacción)
PRODUCCION César Redondo Zayas
PROMOCION Y PUBLICIDAD Elena Sánchez-Fabrés
PROMOCION EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

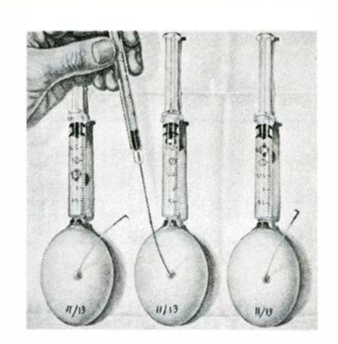
Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

José Luis Somalo: *La verificación de los acuerdos SALT I I* ; Ramón Fontarnau: *Cómo respiran los huevos de las aves;* Antonio Blanco: *Arqueología en el fondo de los lagos;* Joandomènec Ros: *Silvicultura;* Ramón Pascual: *Solitones;* José M.ª Vidal: *Origen del campo magnético terrestre;* José M.ª López Piñero: *La influencia del estetoscopio en el desarrollo de la medicina;* Luis Bou: *Juegos matemáticos;* José E. Myro y Alicia Menéndez: *Taller y laboratorio.*

Libros:

Ramón Margalef, Enrique Gadea y Pedro Pastor Lozano



LA PORTADA

El dibujo de la portada ilustra una técnica para medir las presiones parciales de oxígeno y dióxido de carbono en un huevo de gallina unos días antes de la eclosión (véase "Cómo respiran los huevos de las aves", por Hermann Rahn, Amos Ar y Charles V. Paganelli, en este mismo número). Se sacan de la incubadora huevos de gallina de 18 días, especialmente preparados con un conector de metal y un fino catéter de plástico. Se acopla una jeringa de plástico al conector para sacar una muestra del gas que hay en el interior de la cámara de aire del extremo achatado del huevo. Una vez sacada la muestra, se inclina la jeringa para que la gota de mercurio que hay en su interior cierre la abertura, evitando así que la muestra de gas se contamine con el aire atmosférico. Al mismo tiempo se conecta la jeringa más pequeña de cristal con el catéter de plástico y se saca una muestra de sangre oxigenada de un capilar del corioalantoides. Luego, se determinan las concentraciones de oxígeno y dióxido de carbono en dichas muestras.

Suscripciones:
Prensa Científica, S.A.
Calabria 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 1870 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 36 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
190 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
270 pesetas

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S.A.
Ausias March, 49; Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S.A.
Calabria, 235-239; Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovín
Avda. de Moratalaz, 137; Madrid-30
Tel. 439 41 50 ext. 468
Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.º, 3.ª; Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Dibujo de la portada de Enid Kotschnig

Página	Fuente
7-9	Ilil Arbel
11	Itek Corporation
12	Ilil Arbel
17	J.H. Becking, Instituto de Wageningen, Holanda
18	Dennis R. Atkinson, Universidad de Nueva York en Buffalo
19-20	Patricia J. Wynne
21	Ewald Weibel
22-25	Patricia J. Wynne
29	P.M. Echenique y M.A. Van Hove
30	P.M. Echenique y M.A. Van Hove *(arriba);* cortesía del doctor D. Wolf, de la Universidad de Munich *(abajo)*
31	P.M. Echenique y M.A. Van Hove *(arriba);* cortesía de los doctores M. Alff y W. Moritz, de la Universidad de Munich *(abajo)*
32	P.M. Echenique y M.A. Van Hove *(arriba);* cortesía de los doctores S. Andersson y B. Kasemo, de la Universidad de Göteborg *(abajo)*
33-35	P.M. Echenique y M.A. Van Hove
36	Cortesía de D. Titterington, de la Universidad de Cambridge *(arriba);* P.M. Echenique y M.A. Van Hove *(abajo)*
37-38	P.M. Echenique y M.A. Van Hove
43	Aimé Bocquet, Universidad de Grenoble
44	Alan D. Iselin
45	Aimé Bocquet, Universidad de Grenoble *(arriba);* Alan D. Iselin *(abajo)*
46	Alan D. Iselin
47-48	Aimé Bocquet, Universidad de Grenoble
49	Alan D. Iselin
50	Aimé Bocquet, Universidad de Grenoble
53-54	Richard Pardo, American Forestry Association *(arriba);* Michael Wotton, Weyerhaeuser Company *(abajo)*
55	Ilil Arbel
56-62	Tom Prentiss
65-76	George V. Kelvin
77	Claudio Rebbi y Laurence Jacobs, Brookhaven National Laboratory
78-80	George V. Kelvin
83	Charles R. Carrigan y David Gubbins
85-90	Allen Beechel
95	Ralph Morse, cortesía de Warren Anatomical Library, Harvard Medical School
96-97	Ralph Morse, cortesía de Francis A. Countway Library of Medicine
98	Ilil Arbel
99	Cortesía de Massachusetts General Hospital
102-106	Ilil Arbel
109	*The Louisville Times*
110-113	Michael Goodman

Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición: Tecfa
Guipúzcoa, 36 (local 1) Barcelona-20
Cayfosa. Santa Perpetua de Moguda
Barcelona.
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

LES ASPIN ("La verificación de los acuerdos SALT II") es miembro de la Cámara de Representantes de los Estados Unidos. Nació en Milwaukee, Wisconsin, en donde asistió a la Escuela Graduada y a la Escuela Superior. En 1960 se graduó por la Universidad de Yale con la calificación summa cum laude y obtuvo una beca en Rhodes para la Universidad de Oxford. Elaboró su tesis doctoral sobre economía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, logrando el Ph. D. en 1965. Oficial del Ejército dentro del Cuerpo de Instrucción para Oficiales de la Reserva en 1966, Aspin fue designado asesor económico en la Oficina del Secretario de Defensa Robert S. McNamara. Aspin, que es congresista, ocupa normalmente un puesto en el Comité de los Servicios Armados de la Cámara y en el de Operaciones del Gobierno; preside el Subcomité de Vigilancia dentro del Comité Especializado de Inteligencia de la Cámara.

HERMANN RAHN, AMOS AR y CHARLES V. PAGANELLI ("Cómo respiran los huevos de las aves") son fisiólogos de la respiración. Rahn y Paganelli enseñan fisiología en la Universidad de Nueva York en Buffalo y Ar es profesor senior en el Departamento de Zoología de la Universidad de Tel-Aviv, en Israel. Escriben: "Nuestro interés en los huevos de las aves empezó hace 10 años, cuando O. D. Wangensteen se unió a nuestro grupo de respiración como miembro postdoctorado. Un día preguntó: ¿Cómo respiran los huevos? Puesto que ninguno de nosotros lo sabía, él procedió a demostrar por primera vez cómo la ley de Fick de la difusión explicaría el intercambio gaseoso a través de la cáscara del huevo de gallina. Desde entonces, hemos estudiado los procesos respiratorios en los huevos de muchas especies de aves, tanto en el laboratorio como en expediciones de campo a diversos lugares."

PEDRO M. ECHENIQUE y M. A. VAN HOVE ("Estructuras atómicas de superficies cristalinas") son físicos que trabajan en estado sólido. Echenique estudió en la Universidad de Navarra, donde se licenció en 1972. Al año siguiente, financiado por las fundaciones Juan March y José María Anistrain, se trasladó al Cavendish Laboratory, de la Universidad de Cambridge, donde se doctoró en 1976. Ha trabajado como investigador en la Universidad de Lund (Suecia), en el Niels Bohr Institute de Copenhague y en el Oak Ridge National Laboratory. Dentro de la física del estado sólido, centra su interés en la física de superficies y de la interacción de partículas cargadas y radiación con materia condensada. Van Hove se graduó en el Politécnico de Zurich, pasando después a los laboratorios Philips, en Eindhoven (Holanda) y luego al Cavendish Laboratory. Ha trabajado en la Universidad de Milwaukee, en el Instituto de Tecnología de California y en la Universidad de Munich. Hoy investiga en la Universidad de California en Berkeley, siendo su campo de trabajo la física y química de superficies tanto en LEED, en el que ha contribuido a la determinación de gran número de estructuras, como en otras espectroscopias superficiales.

AIMÉ BOCQUET ("Arqueología en el fondo de los lagos") es conferenciante de prehistoria de la Universidad de Grenoble y director y fundador del Centro de Documentación de Prehistoria Alpina, una asociación privada de 20 años de antigüedad, dedicada a la difusión de información prehistórica regional entre científicos, educadores y público en general. De profesión dentista, Bocquet organizó, y ha dirigido desde 1972, el taller experimental y las excavaciones de fondo de lago en el lago Paladru, en la provincia francesa del Delfinado, no lejos de la frontera suiza.

STEPHEN H. SPURR ("Silvicultura") es profesor de botánica y de asuntos públicos en la Universidad de Texas en Austin. Realizó sus tareas de estudiante en botánica en la Universidad de Florida y sus estudios de graduado en la School of Forestry and Environmental Studies de la Universidad de Yale, en donde se graduó en 1940. Después de obtener su doctorado en ecología forestal en Yale en 1950, se incorporó a la facultad de la School of Forestry de la Universidad de Minnesota. Se trasladó en 1952 a la Universidad de Michigan, donde durante los siguientes 19 años desempeñó varios cargos administrativos clave. En 1971 fue nombrado presidente de la Universidad de Texas, cargo que ocupó hasta 1974. Su investigación en el campo forestal incluye estudios sobre fotografía aérea, medida de la vegetación y un amplio abanico de estudios en silvicultura y ecología forestal.

CLAUDIO REBBI ("Solitones") es físico teórico de la plantilla del Brookhaven National Laboratory. Nacido en Trieste, estudió física en la Universidad de Turin, donde recibió su doctorado en 1967. Gozó luego de una beca postdoctoral en el Instituto de Tecnología de California, y tras volver a Europa, enseñó en Trieste y fue investigador asociado en la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), en Ginebra. Se trasladó de nuevo a los Estados Unidos en 1974 como profesor asociado visitante de física en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Entró en la plantilla de Brookhaven en 1977.

CHARLES R. CARRIGAN y DAVID GUBBINS ("Origen del campo magnético de la tierra") son geofísicos y trabajan en la Universidad de Cambridge. Carrigan estudió astronomía y física en la Universidad de California en Los Angeles, y continuó investigando allí, una vez finalizados sus estudios, bajo la dirección de Friedrich H. Busse. Se doctoró por UCLA en 1977, con un trabajo experimental sobre simulación en el núcleo de la tierra. Se trasladó luego con una beca a Cambridge, en donde investigó a las órdenes de D. P. McKenzie sobre "problemas experimentales relacionados con la convección térmica del manto superior". Gubbins enseña geodesia y geofísica en Cambridge, donde se doctoró en 1972. Pasó por la Universidad de Colorado, el Instituto de Tecnología de Massachusetts, y por último, por UCLA; allí conoció a Carrigan. Volvió a Cambridge en 1976 y se incorporó en el claustro de la Facultad el año siguiente.

STANLEY JOEL REISER ("La influencia del estetoscopio en el desarrollo de la medicina") es director del programa de historia de la medicina en la Harvard Medical School y asociado clínico en medicina interna en el Massachusetts General Hospital. Graduado en la Columbia University, se doctoró en medicina el año 1963 en el Downstate College of Medicine de la Universidad del estado de Nueva York. En 1969, comenzó a enseñar historia de la medicina en la Harvard Medical School.

Hace...

José Mª López Piñero

...cuatrocientos años

Comenzó a enseñar astronomía en la Universidad de Salamanca el valenciano Jerónimo Muñoz que, con anterioridad, había sido profesor en las de Ancona y Valencia. En la importante obra científica de Muñoz, destacan sus observaciones de la *nova* de 1572, las más tempranas y exactas de las efectuadas en Europa. La citada *nova* ocupa un lugar de relieve en la historia de la astronomía porque, como afirma C.D. Hellman, las observaciones y los comentarios que motivó subrayaron los fallos de las teorías tradicionales, ayudando a allanar el camino a la aceptación del copernicanismo. El propósito explícito de Muñoz fue demostrar que la *nova* estaba situada en el mundo celeste y no en el "sublunar" y que, por tanto, en el primero se producían cambios, frente a lo que suponía la doctrina aristotélica.

"Tengo entendido –afirma en su *Libro del nuevo Cometa* (Valencia, 1573)– el deseo grande que muchos tienen de saber este nuevo cuerpo que aparece en el cielo, si es estrella o si es cometa, que hay diferentes opiniones acerca desto y dudan del lugar donde esta estrella está". Esas dudas proceden "de la fe y crédito que dan a Aristóteles, el cual con agudas palabras les ha dado a entender que el cielo es de su naturaleza incorrruptible", de tal forma, que "no han podido entender lo que con los ojos pudieron ver". Muñoz, por el contrario, asegura con arrogancia que, "habiéndome hecho Dios merced de darme ingenio libre, bien inclinado y aparejado para entender cualquier facultad, viendo la flaqueza de las razones de Aristóteles con que quiere probar ser el cielo eterno, y habiendo observado con instrumentos las mudanzas que hay en el cielo... he entendido que es falso lo que dice... y he sido forzado por razones naturales y demostraciones geométricas conceden que hay en el cielo corrupción".

Con la terminología imprecisa de la época, Muñoz llamó a la *nova* "cometa", pero subrayando que "está en el cielo y tiene naturaleza o parentesco con las estrellas fijas". Lo importante es que lo demostró con sus observaciones, comprobando que su paralaje era tan pequeña que no podía ser "sublunar".

El *Libro del nuevo cometa* fue traducido al francés y al latín, siendo reproducido en este último idioma por Tycho Brahe en su *Astronomía instauta* (1602). A la difusión de la obra de Muñoz en toda Europa contribuyó también la publicación de una carta latina suya sobre la *nova* de 1572.

...trescientos años

Gaspar Bravo de Sobremonte publicó en Lyon la tercera parte de sus *Resolutiones medicae.* Catedrático de la Universidad de Valladolid y médico de cámara regio, fue uno de los más importantes galenistas "moderados" en la España de mediados del siglo XVII. Como todos los autores de esta mentalidad, aceptó las novedades científicas que le parecieron innegables, pero como meras rectificaciones de detalle que no afectaban la validez general de las doctrinas tradicionales.

Defendió, por ejemplo, la doctrina de la circulación de la sangre, rebatiendo con los mejores datos anatómicos y fisiológicos de su tiempo las objeciones que a la teoría de William Harvey habían planteado el inglés James Primerose y el italiano Emilio Parisano. Llegó a afirmar que Galeno y los demás autores antiguos no pudieron, por ejemplo, conocer los vasos quilíferos "porque hacían anatomías solamente en los cadáveres, en los que estos vasos no aparecen, sino que sólo lo hacen en los animales vivos después de sus horas de ingerido el alimento". Todo ello no obsta para que, tras haber rectificado los errores de la angiología galénica, mantenga intocada el "arte esfígmica" tradicional. "La definición dada por Galeno explica completamente la naturaleza del pulso", afirma de modo terminante.

Semejante fue la actitud de Bravo frente a las aplicaciones de la nueva química a la medicina. Consideró inaceptable la patología iatroquímica, llenando de insultos a Paracelso, a Van Helmont y a sus seguidores. En cambio, aceptó los medicamentos químicos, "puesto que son útiles para curar muchas enfermedades, si se aplican debidamente". Los galenistas franceses de estos años se opusieron rotundamente a la utilización terapéutica del antimonio. Bravo de Sobremonte, por el contrario, le dedicó uno de los estudios monográficos de sus *Resolutiones,* recomendando su uso, aunque de acuerdo con los supuestos tradicionales.

...doscientos años

Dionisio Alcalá Galiano participó por vez primera en un combate naval, durante la guerra entre Inglaterra y España. Tenía entonces solamente diecinueve años. Un cuarto de siglo después moriría en la batalla de Trafalgar. Como personaje histórico, no debe, sin embargo, su relieve a sus acciones guerreras, sino a sus contribuciones como científico. Fue una de las más notables figuras del nutrido grupo de marinos españoles de esta época que cultivaron de modo sobresaliente la náutica, la cartografía y la astronomía.

A partir de 1784, Alcalá Galiano colaboró en diversas expediciones hidrográficas, entre ellas, la de Antonio de Córdoba al Estrecho de Magallanes y la de Vicente Tofiño a las Azores, así como en la dirigida por Alejandro Malaspina, que cartografió la costa occidental de América. En septiembre de 1789, montó un observatorio en Montevideo, con la colaboración de Felipe Bauzá, para estudiar el paso de Mercurio por delante del Sol. "Esperamos el paso de Mercurio sobre el disco del Sol –anotó en su diario– que lo hemos calculado por las latitudes y longitudes heliocéntricas, usando para Mercurio las nueve tablas de Monsieur de la Lande, como por extenso se ve en el cálculo. No encontramos acordes con nuestros resultados los del conocimiento de tiempos del *Almanak Náutico,* pero estamos seguros de haber usado en nuestros cálculos la mayor prolijidad". La comprobación de este desacuerdo sería utilizada medio siglo más tarde por Le Verrier, en sus clásicas investigaciones sobre la órbita de Mercurio. Alcalá Galiano se ocupó también del problema de la determinación de latitudes y longitudes en el mar, aportando técnicas in-

novadoras originales. Escribió una importante *Memoria* sobre el tema, que fue publicada en Madrid por la Imprenta Real el año 1796.

...cien años

Apareció el trabajo del cirujano gaditano Federico Rubio, "Modo de tratar el pedículo de la ovariotomía", coronación de casi dos décadas de experiencia, ya que en 1860 había practicado su primera ovariotomía, muy poco después de que Thomas Spencer Wells iniciara la primera serie mundial de esta intervención.

Rubio fue la más brillante de las figuras que, entre 1860 y 1880, introdujeron en España las arriesgadas intervenciones que permitió la revolución quirúrgica. Aparte de la ovariotomía, anotaremos solamente que en 1861 realizó su primera histerectomía; en 1874, su primera nefrectomía; y en 1878, la primera extirpación total de la laringe, cinco años después de la efectuada por Theodor Billroth. Prestó gran atención a la hemostasia, a la antisepsia y a las técnicas de anestesia, pero destacó especialmente por su interés hacia la histología normal y patológica y la microbiología, de las que fue uno de los más tempranos cultivadores españoles. Entre sus trabajos histopatológicos, iniciados en 1871, sobresalen los consagrados a los tumores. Recordemos también que, en 1872, expuso la clasificación y el significado etiológico de las bacterias en un trabajo en colaboración con el dermatólogo José Eugenio de Olavide, autor con el que realizó investigaciones experimentales sobre diversos parásitos microscópicos. Hay que destacar, además, que fue uno de los primeros médicos europeos que llegó a formular de modo preciso lo que hoy llamamos patología social.

Por otra parte, Federico Rubio fue el promotor de dos instituciones de gran peso en la renovación de la medicina española de su tiempo: la Escuela Libre de Medicina y Cirugía de Sevilla y el Instituto de Terapéutica Operatoria de Madrid. De dicho aspecto de su labor se ocupará próximamente una nota de esta sección.

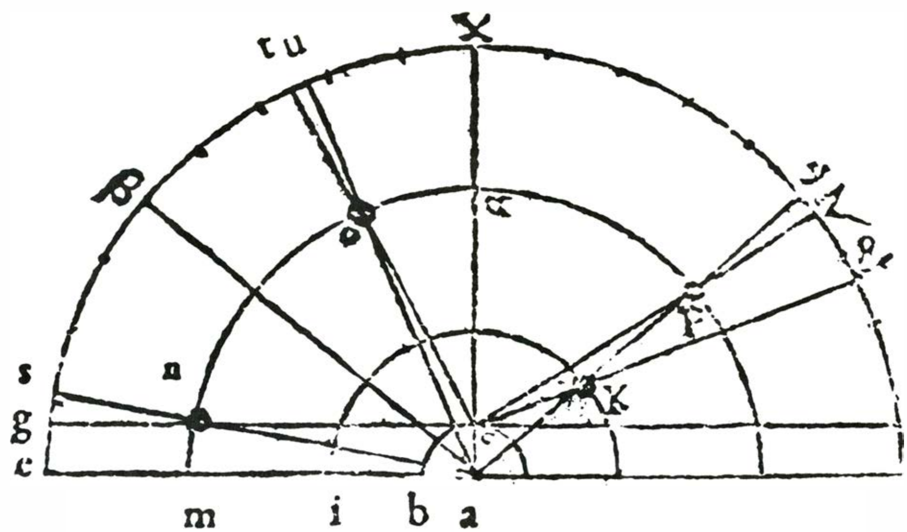
...cincuenta años

Rafael Benjumea y Burín creó el Circuito Nacional de Firmes Especiales, como uno de los organismos encargados de descentralizar la planificación de las obras públicas, así como el Consejo de Energía, destinado a coordinar la producción eléctrica nacional. Dichas fundaciones fueron acontecimientos destacados de su gestión como ministro de Fomento durante la dictadura de Primo de Rivera, desde 1925 a 1930.

Formado en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, Benjumea sobresalió en la construcción de presas hidroeléctricas durante el primer cuarto del presente siglo. Sus realizaciones más notables fueron la presa de Jandula en el curso del río Guadalquivir, junto a Bailén, y el pantano del Chorro, en el río Guadalhorce. Por la construcción de este último, que permitió electrificar la zona y regar veinte mil hectáreas, fue nombrado Conde de Guadalhorce por Alfonso XIII. Era de mentalidad regeneracionista, directamente inspirada en la obra de Joaquín Costa, y partidario del colectivismo. Entre 1931 y 1948, residió en Francia y Argentina, desarrollando en ambos países actividad como ingeniero. Contribuyó, por ejemplo, a la planificación y a la construcción del metropolitano de Buenos Aires.

nueuo Cometa. 22

de. 67.gra. 30. mi. la minima es de. 11. gra. 30. mi. ſi junctas eſtas dos hazen. 79. gra. quanto es el doble de la altura del norte de Valencia, luego ſi por ſus dos alturas ſe halla la uerdadera altura del Norte, las dos alturas fueron uerdaderas, y no apparentes: porque ſi el tuuiera Parallaxis las dos alturas fueran apparentes, y menores que las uerdaderas, y no pudieran moſtrar la altura del Norte: en la qual no hay Parallaxis, como puedes uer en eſta figura.



En la qual la altura del norte de Valēcia es eB. Y ſi el Cometa en el puncto, o tuuiera Parallaxis, fuera ſu altura et, apparente. Y la uerdadera ſuera en mayor q̃ la et, y la menor altura del fuera eg, apparente, y la uerdadera fuera es, mayor que eg, ſi juntas los dos arcos de las alturas apparentes et y eg, hallaras que ſon menores que las dos alturas

Libro del nuevo Cometa, *de Jerónimo Muñoz. La figura corresponde a su demostración de la* **nova** *de 1572 "está en el cielo y tiene naturaleza o parentesco con las estrellas fijas".*

La verificación de los acuerdos SALT II

Los Estados Unidos disponen de un conjunto de recursos técnicos nacionales de vigilancia, capaces de descubrir cualquier intento soviético encaminado a conseguir una significativa superioridad, violando los nuevos acuerdos

Les Aspin

La clave de cualquier acuerdo internacional para el control de armamentos estriba en la capacidad de cada uno de ambos bandos para asegurarse de que el contrario va a respetarlo. Sin una adecuada comprobación de su cumplimiento, unos acuerdos del tipo de los pactos bilaterales sobre armas estratégicas entre Norteamérica y Rusia están condenados al fracaso. Mientras el Senado se prepara para debatir la ratificación del nuevo tratado, consecuente a la segunda ronda de conversaciones sobre limitación de armas estratégicas (SALT II) mantenidas entre ambas superpotencias, empiezan a percibirse acusaciones sobre un posible intento por parte de los rusos de burlar sus disposiciones. Estas acusaciones suscitan varios interrogantes fundamentales en torno a la verificación: ¿cómo podría la Unión Soviética intentar un engaño? ¿Cómo podrían los Estados Unidos llegar a descubrir tales posibles violaciones? ¿Qué podría resultar rentable para la Unión Soviética y qué podrían permitirse perder los Estados Unidos en el caso de que los rusos intentasen violar el tratado SALT II? Examinemos cada uno de estos interrogantes al objeto de llegar a averiguar exactamente cuáles son los problemas reales de la referida verificación.

El acuerdo SALT II se compone, al parecer, de dos partes fundamentales: un tratado duradero hasta 1985 y un protocolo vigente hasta 1982. En la ilustración de la página siguiente se muestra un resumen de las disposiciones incluidas en estos dos grandes subtítulos.

El nuevo tratado SALT ofrece, en primer lugar, una gradual reducción en el número total de lanzadores de armas ofensivas estratégicas autorizadas a cada bando, partiendo de 2400 en el momento de la ratificación, para descender hasta 2250 al llegar a 1982. A efectos del tratado, se definen como lanzadores estratégicos todos aquellos que incluyen misiles balísticos intercontinentales con base en tierra (ICBM, del inglés "Intercontinental ballistic missiles"), misiles balísticos de lanzamiento submarino (SLBM, del inglés "Submarine-launched ballistic missiles") y bombarderos pesados de largo alcance.

Rusia podría intentar burlar el tope marcado como número máximo de lanzadores estratégicos por tres procedimientos: desarrollando nuevos tipos de armas estratégicas, desplegando más armas de los tipos ya existentes, o transformando armas tácticas en estratégicas (aumentando, por ejemplo, su alcance).

El primero de estos posibles métodos de engaño –despliegue de nuevos tipos de armas estratégicas– es quizás el procedimiento menos factible y el más fácilmente detectable de todos los que la Unión Soviética podría emplear para violar el límite máximo de lanzadores impuesto por las SALT II. El establecimiento de un arma nueva de características estratégicas requiere al menos cinco fases: investigación, desarrollo, pruebas, producción y despliegue. En cualquiera de estas fases, la actual capacidad de los Estados Unidos para detectar actividades clandestinas rusas oscila entre los calificativos de aceptable y excelente. El punto clave consiste, sin embargo, en el hecho de que los rusos tendrían necesidad de enmascarar las cinco fases; y las probabilidades de fracaso en el logro de tal empeño son extremadamente elevadas.

Consideremos los procedimientos por los que Norteamérica es capaz hoy de controlar una cualquiera de estas fases: por ejemplo, la de pruebas de estos lanzadores. Los modernos radares norteamericanos de "línea recta" pueden identificar la "caligrafía" de las microondas reflejadas, asociadas con cada uno de los grandes grupos de misiles rusos. Además, los radares del tipo "por encima del horizonte" pueden penetrar hasta el interior de la Unión Soviética y reconocer la huella característica que cada tipo de misil deja al perturbar la ionosfera terrestre. También los satélites de señal precoz, inicialmente destinados a detectar un ataque ruso con ICBM, pueden ser utilizados para controlar pruebas con misiles; los sensores infrarrojos de estos satélites pueden identificar el penacho del escape de un misil cuando éste sea disparado en un ejercicio de pruebas. Por último, los Estados Unidos disponen de un conjunto muy complejo de sensores, que incluyen mecanismos variados instalados sobre buques y aeronaves, los cuales controlan y recorren de forma rutinaria todas las zonas de impactos para pruebas de misiles en la totalidad de la periferia de la Unión Soviética y en el Pacífico. La información reunida, procedente de estas fuentes, puede utilizarse para distinguir nuevos tipos de misiles de los antiguos ya conocidos.

En pocas palabras, los "recursos técnicos nacionales" de vigilancia disponibles en Estados Unidos para la observación de unas posibles pruebas de misiles rusos son múltiples, redundantes y complementarios. Ello permite la detección de todos los misiles de largo alcance lanzados desde bases experimentales en la Unión Soviética. Resultan, en verdad, mucho más fiables que la mayor parte de los recursos humanos de información (es decir, el espionaje), los cuales pueden proporcionar información de segunda mano, atrasada e incluso falsa.

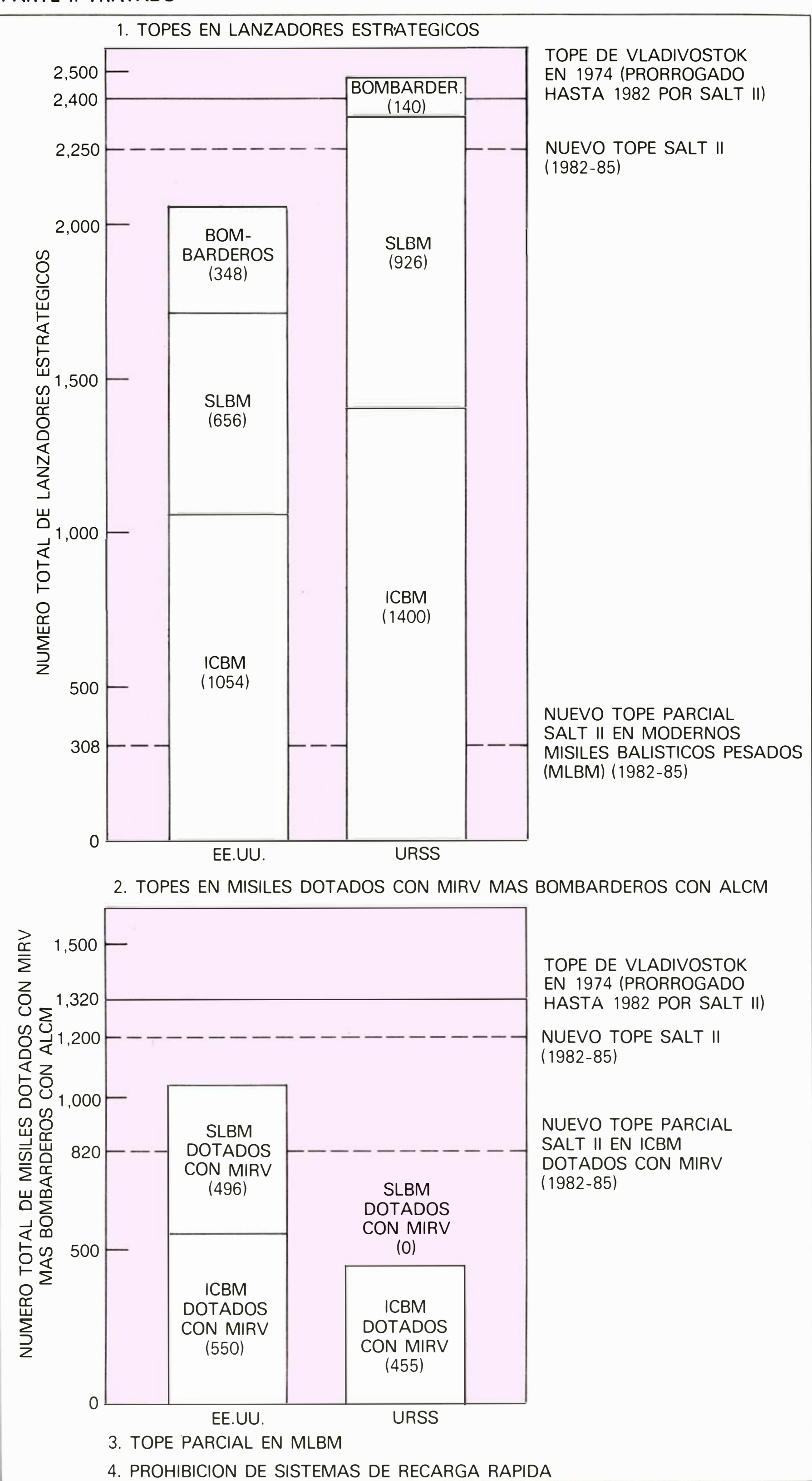
Insistiendo en lo anterior, la fase de pruebas es sólo uno de los cinco peldaños que es necesario recorrer antes de que una nueva arma pueda ser introducida en el campo estratégico. Otros procedimientos de detección pueden poner al descubierto un intento ruso de burlar este aspecto particular del tratado, bien antes de la fase de pruebas (durante las

fases de investigación y de desarrollo), o bien después de la fase de pruebas (en las fases de producción y despliegue).

El segundo método potencialmente a disposición de la Unión Soviética para intentar un fraude en el conjunto de los topes acordados para lanzadores estratégicos –despliegue de un mayor número de armas de los tipos ya existentes– resulta más difícil de controlar que el método analizado en primer lugar; si bien, las posibilidades norteamericanas de detección en este campo son realmente muy elevadas. Los recursos técnicos nacionales de vigilancia adoptados por este país se muestran particularmente eficaces para detectar la producción y despliegue de un número suplementario de submarinos y bombarderos pesados portadores de misiles.

Los submarinos estratégicos son buques grandes, con un desplazamiento de 8000 a 9000 toneladas y con una longitud superior a la del lado mayor de un campo de fútbol americano. Resultan difíciles de ocultar. Además, existen únicamente en Rusia dos arsenales en los que actualmente puedan fabricarse submarinos de este tipo. Estos dos complejos, así como cualquier otra zona de ubicación potencialmente adecuada para la construcción de submarinos, están sometidos a constante vigilancia. Incluso en el caso de que pudiera construirse un nuevo submarino portamisiles al amparo de una cobertura impenetrable (suponiendo que se lograra además el éxito simultáneo y total en todas las actividades de apoyo necesarias relacionadas con tal fabricación), el nuevo submarino se vería finalmente obligado a abandonar la etapa de construcción. A partir de ese momento y en lo sucesivo se presentarían innumerables oportunidades de someterlo a observación. El despliegue de un número adicional de misiles en submarinos rusos tampoco puede permanecer sin descubrir.

De forma parecida, el descubrimiento de cualquier incremento en el número



TEMAS PRINCIPALES del acuerdo SALT II elaborado en los últimos meses por los negociadores norteamericanos y rusos. Dichos temas se hallan recogidos en dos documentos: un tratado duradero hasta 1985 *(primera parte)* y un protocolo vigente hasta 1982 *(segunda parte)*. En algunas de las ilustraciones que acompañan este artículo se ha acudido a diversas siglas para los siguientes tipos de armas estratégicas: misiles balísticos intercontinentales (ICBM); misiles balísticos de lanzamiento submarino (SLBM); modernos misiles balísticos pesados (MLBM); vehículos de reentrada múltiple contra objetivos independientes (MIRV); y misiles crucero lanzados desde el aire (ALCM). En realidad, las limitaciones del tratado SALT II en relación con los MLBM son únicamente aplicables a la Unión Soviética, toda vez que los Estados Unidos no tienen planificados estos tipos de misiles pesados con base terrestre.

de bombarderos pesados en las fuerzas aéreas rusas es una tarea relativamente sencilla. Las líneas de producción de los dos tipos actuales de bombardero pesado –a los que hacen referencia los analistas militares norteamericanos con los nombres del "Oso" y el "Bisonte"–, hace ya tiempo que están al descubierto. Una renovada producción de estos dos tipos de avión podría ser detectada por los Estados Unidos con un elevado grado de seguridad, según queda de manifiesto ante la capacidad demostrada por nuestro país para controlar la producción de elementos del equipo militar ruso de mucho menor tamaño, como pueden ser los carros de combate. Un despliegue adicional de bombarderos pesados resultaría además difícil de ocultar. Sólo existen 10 bases aéreas en la Unión Soviética con suficiente capacidad para bombarderos pesados, y todas ellas están sometidas a estrecha vigilancia por los satélites de observación norteamericanos. Si los rusos llegasen a decidirse a construir nuevas bases aéreas equipadas para llevar a cabo tales planes, su descubrimiento resultaría sencillo: las pistas de aterrizaje no pueden esconderse bajo tierra. En el caso de que los rusos –tal como algunos comentaristas estratégicos piensan– tuviesen la intención de desplegar un nuevo tipo de bombardero pesado a comienzos de 1980, resultaría también fácilmente detectable.

El descubrimiento de un despliegue adicional de misiles estratégicos con base terrestre sería tan sólo algo más difícil. Considerando la actual perfección rusa en estos asuntos, los Estados Unidos pueden identificar con bastantes garantías de éxito, por medio de fotografías desde satélite, actividades tan indiscretas de la Unión Soviética como pueden ser la construcción de nuevos silos ICBM para misiles balísticos intercontinentales y el transporte de misiles a sus nuevas zonas de despliegue. Puede detectarse, asimismo, el emplazamiento de sistemas de mando y control como equipo de apoyo complementario.

Si los rusos tratasen de ocultar tales actividades, podrían probablemente tener algo más de fortuna que si intentasen hacerlo con submarinos estratégicos. Después de todo, los lanzadores ICBM con base terrestre son más pequeños que los submarinos, y en el interior de la Unión Soviética hay grandes zonas en las que podrían ser construidos o ubicados. Pero aun en el caso de ICBM adicionales, las posibilidades de un engaño a gran escala y con éxito son muy escasas. Los rusos podrían intentar la fabricación de más lanzadores para ICBM a campo descubierto, considerando que la inmensidad de su territorio podría ocultar la violación, pero ello constituiría un error. Los satélites norteamericanos de vigilancia proporcionan en la actualidad una cobertura completa fotográfica de la Unión Soviética a intervalos frecuentes. Si aparecen sospechas ante fotografías rutinarias de perspectiva a escala normal, puede ordenarse nuevas fotografías de la zona en cuestión a la escala apropiada y con los detalles necesarios para conseguir una información más detallada. La actual generación de cámaras fotográficas de alta capacidad instaladas en los satélites de vigilancia norteamericanos permite, en teoría, obtener imágenes muy nítidas de objetos de unos 30 centímetros cuadrados, desde una altitud de unas cien millas. Fotografías tan perfectas dejan pocas dudas acerca de la naturaleza de las actividades en cuestión.

Los rusos podrían intentar, por otra parte, desplegar lanzadores adicionales ICBM bajo camuflaje, o de noche. Sin embargo, los satélites norteamericanos están ya equipados con un conjunto de sensores de espectro múltiple que pueden desvelar el camuflaje o enmascaramiento y que son capaces de observar las actividades nocturnas. Los sensores infrarrojos son particularmente adecuados para la detección de silos enterrados de misiles y silos que hayan sido camuflados. Debido a que el terreno en las inmediaciones de un objeto sospechoso presenta una temperatura diferente de la del resto de la zona (o bien refleja unas características de emisión infrarroja diferente), un silo de misiles enterrado o enmascarado aparecerá en la imagen infrarroja.

En razón del tiempo que los fotointerpretadores necesitan para analizar los datos contenidos en tales fotografías de satélite, podrían llegar a resultar difíciles de identificar y detectar las violaciones a pequeña escala. Sin embargo, cualquier esfuerzo de importancia para intentar un fraude en este sentido (digamos, por ejemplo, el aumento clandestino de unos 100 ICBM) quedaría, a buen seguro, al descubierto.

El tercer método de defraudación en el conjunto de los topes acordados en lanzadores estratégicos –la conversión de armas no estratégicas en estratégicas– representa un problema de verificación más intrincado. Dos ejemplos notables de armas rusas de alcance intermedio que podrían transformarse en armas de largo alcance (y, por tanto, pasar a ser de carácter estratégico) son el bombardero Backfire y el misil balístico de alcance intermedio SS-20 (IRBM, del inglés "intermediate-range ballistic missile").

Existe una ligera discrepancia dentro del servicio norteamericano de inteligencia sobre si el principal objetivo del Backfire es llevar a cabo misiones en zonas periféricas de la Unión Soviética (como Europa y China). Aproximadamente la mitad de los Backfire desplegados hasta la fecha han recibido misiones aeronavales, y el resto forma parte de las fuerzas de bombarderos medios de Rusia. Sin embargo, existen pocas dudas sobre el hecho de que el Backfire posee cierta capacidad intercontinental, en especial para recorridos de ida con recuperación en un tercer país, para misiones de ataque contra el oeste de los Estados

	LANZADORES DE ARMAS ESTRATEGICAS	NUMERO DE LANZADORES DESPLEGADOS	NUMERO DE CABEZAS POR LANZADOR	NUMERO TOTAL DE CABEZAS
DOTADO CON MIRV	MINUTEMAN III ICBM	550	3	1,650
	POSEIDON C-3 SLBM	496	10	4,960
	SUBTOTAL	1,046		6,610
NO DOTADO CON MIRV	TITAN II ICBM	54	1	54
	MINUTEMAN II ICBM	450	1	450
	POLARIS A-3 SLBM	160	1 (3 MRV)	160
	B-52D BOMBARDERO	79	4	316
	B-52G, B-52H BOMBAR.	269	4	1,076 (+ 1,500 SRAM)
	SUBTOTAL	1,012		3,556
	TOTAL	2,058		10,166

ARSENAL ESTRATEGICO de los Estados Unidos, que aparece dividido en esta tabla en dos grandes categorías: lanzadores dotados con vehículos de reentrada múltiple contra objetivos independientes y lanzadores no dotados. El número de cabezas nucleares señalado para el SLBM Poseidon C-3 se considera una cifra término medio. El número de B-52 disponibles para misiones estratégicas representa una estimación aproximada. El número de cabezas por cada B-52 estratégico contabilizado representa una carga tipo; los aviones B-52H y B-52G llevan una carga adicional de misiles de ataque de corto alcance (SRAM). Los tres vehículos de reentrada del Polaris A-3 SLBM no son de objetivo independiente; no se consideran, pues, como MIRV. Se han omitido los misiles crucero y los FB-111.

Unidos en recorridos de ida y vuelta, e incluso para otros tipos de misiones a distancias superiores de ida y regreso, con tal de ser repostados en vuelo.

Aunque el tratado SALT II excluye a los Backfire del cómputo total de lanzadores estratégicos, este tratado va acompañado de una serie de resortes de seguridad (algunos en forma de declaraciones unilaterales) que limitan el valor estratégico de este avión. Estas medidas de seguridad podrían incluir limitaciones en la producción y despliegue del Backfire, restricciones en el empleo del bombardero en relación con aviones cisterna capaces de repostajes en vuelo, así como limitaciones en la autonomía del bombardero y en su carga útil. De todas estas medidas de seguridad, la más sencilla de verificar sería la referente a las limitaciones en la producción y despliegue (incluso dando por supuesto un intento de fraude), simplemente a causa de la envergadura y complejidad que estas actividades supondrían. Estos impedimentos o limitaciones son aplicables no sólo a los Backfire, sino igualmente a los estratégicos Oso y Bisonte anteriormente mencionados.

La verificación de las restricciones en materia de cisternas resultaría algo más difícil. Los pilotos de las fuerzas aéreas norteamericanas pueden testificar las dificultades de repostar en el aire. Resulta dudoso en extremo que los rusos pudieran intentar realmente el reabastecimiento de combustible de sus Backfire en pleno conflicto bélico, sin haber realizado algunas operaciones de entrenamiento previamente; y estos tipos de prácticas pueden ser intervenidos y controlados por una serie de procedimientos, entre los que se incluyen la escucha y captación de comunicaciones aéreas. Si los rusos decidieran arriesgarse e intentar este tipo de operaciones en tiempo de guerra, sin ensayos previos, no se dispone de procedimientos garantizados de verificación de este tipo de restricciones en relación con el empleo de aviones cisterna.

El resorte de seguridad de los acuerdos SALT II que mayores dificultades de verificación presenta en relación con los aviones Backfire es el referente a las características del avión, en especial su autonomía y carga útil. Incluso en condiciones de vigilancia sin oposición, los investigadores de los Estados Unidos no han llegado a ponerse de acuerdo en el tema de la autonomía del Backfire. Suponiendo que Rusia hiciese coincidir su capacidad y determinación de llevar a cabo un fraude en este terreno, quizá pudiesen velarse la autonomía y la carga útil de los Backfire.

	LANZADORES DE ARMAS ESTRATEGICAS	NUMERO DE LANZADORES DESPLEGADOS	NUMERO DE CABEZAS POR LANZADOR	NUMERO TOTAL DE CABEZAS
DOTADO CON MIRV	SS-17 ICBM	100	1 O 4	~ 2.500
	SS-18 ICBM	170	1 O 8	
	SS-19 ICBM	320	1 O 6	
	SUBTOTAL	590		~ 2.500
NO DOTADO CON MIRV	SS-9 ICBM	130	1	130
	SS-11 ICBM	620	1 (3 MRV)	620
	SS-13 ICBM	40	1	40
	SS-16 ICBM	20	1	20
	SS-N-6 SLBM	528	1 (2 MRV)	528
	SS-N-8 SLBM	286	1	286
	SS-N-17 SLBM	16	1	16
	SS-N-18 SLBM	96	1	96
	BOMBARDERO "OSO"	100	2	200
	BOMBARD. "BISONTE"	40	2	80
	SUBTOTAL	1,876		2,016
	TOTAL	2,466		~ 4 500

ARSENAL ESTRATEGICO de la Unión Soviética, que aparece calculado en esta tabla con un formato similar al de la ilustración anterior. De acuerdo con las nuevas "normas de contabilidad", impuestas por las SALT II, los totales parciales que aquí aparecen referidos a los MIRV, incluyen alrededor de 135 ICBM que no han sido todavía transformados en MIRV, y que, por tanto, son aún portadores de una cabeza simple. Además, se ha omitido el bombardero de alcance intermedio al que los analistas norteamericanos se refieren con el nombre de Backfire. En general, estos sistemas numéricos de comparar la potencia relativa de ambas naciones tienen el inconveniente de no poner de manifiesto las ventajas sustanciales de los Estados Unidos sobre la Unión Soviética en lo relativo a la precisión y a la seguridad de los misiles. Asimismo, estas tablas no reflejan el hecho de que Norteamérica dispone de miles de armas nucleares tácticas que son capaces de alcanzar objetivos en la Unión Soviética, mientras que Rusia no dispone de nada similar para alcanzar objetivos en U.S.A.

El otro tipo de arma de alcance intermedio que podría transformarse en arma de características estratégicas es el IRBM (misil balístico de alcance intermedio) SS-20. El SS-20 no está incluido en el tratado SALT II, ya que su actual alcance (3000 kilómetros) es menor que los 5500 kilómetros que marcan el límite inferior utilizado para definir los ICBM. El problema potencial surge del hecho de que el SS-20 abarca las dos primeras etapas de las tres que comprende el avanzado ICBM SS-16; por añadidura, el lanzador móvil utilizado para el SS-20 es idéntico al que emplea el SS-16. Una acumulación clandestina por parte de los rusos podría convertir, a corto plazo, sus SS-20 en SS-16, tanto en sus tres fases, como en su carga útil. Esta línea de acción podría proporcionarles un incremento significativo en su potencial de ICBM de forma casi inadvertida.

Sin embargo, el acuerdo SALT II prohíbe expresamente la producción, pruebas y despliegue de nuevos ICBM SS-16, así como exige el que más adelante sean desmantelados los SS-16 existentes. Por ello, si los rusos tratasen de aumentar su potencia en ICBM, añadiendo una tercera fase y una diferente carga útil a sus SS-20, para convertirlos en SS-16, se verían obligados a hacerlo sin disponer de la oportunidad de realizar pruebas con el nuevo sistema. Los modelos prototipos existentes del SS-16 no han sido probados desde hace casi dos años y la última experimentación resultó, al parecer, un fracaso.

En pocas palabras, la producción de un SS-20 perfeccionado provoca otro modelo necesitado de experimentación. Para que un SS-20 perfeccionado pueda proporcionar algún tipo de garantía, y en especial las garantías suficientes para poder satisfacer a los tradicionalmente conservadores planificadores militares soviéticos, la Unión Soviética se vería obligada a realizar experiencias con algunos de ellos. Y como se ha señalado anteriormente, este tipo de pruebas clandestinas de nuevos misiles estratégicos por parte de la Unión Soviética resultan imposibles en la práctica.

El problema de impedir que los rusos puedan convertir armas no estratégicas en otras de carácter estratégico se complica por otro factor: la existencia de 90 a 100 bombarderos pesados "reconfigurados" en su arsenal. Estos aviones han sido modificados para adaptarlos a su empleo en misiones de reconocimiento y lucha antisubmarina, aunque sigan manteniendo sus dispositivos de bombardeo. Cualquier otra modifica-

ción permanente en la configuración de la mayor parte de estos aviones podría ser detectada a tiempo. Sin embargo, aproximadamente una docena de estas aeronaves fueron construidas en un principio de suerte que pudieran convertirse con rapidez en bombarderos pesados dentro de sus mismos aeródromos o bases aéreas, haciendo muy difícil el logro de una pronta y adecuada verificación en sus características no estratégicas.

Además de las limitaciones en el número de lanzadores, el tratado SALT II contiene otros topes numéricos en lo referente a misiles equipados con vehículos de reentrada múltiple contra objetivos independientes (MIRV, del inglés "Multiple independently targetable reentry vehicles") y a bombarderos equipados con misiles crucero estratégicos lanzados desde el aire (ALCM, del inglés "Air-launched cruise missiles"). De acuerdo con el tratado, la suma de ambos tipos de sistemas no debe superar la cifra de 1320. Además, cada bando sólo puede disponer de un máximo de 1200 misiles MIRV, y el número de ICBM equipados con MIRV estará limitado al tope máximo de 820.

Existen cuatro procedimientos por los que los rusos podrían intentar aumentar sus cifras totales entre MIRV y ALCM por encima de los límites fijados por el tratado: fabricar nuevos silos ICBM y submarinos SLBM para sus misiles MIRV adicionales; sustituir misiles MIRV por otros de características diferentes en los silos de misiles o submarinos ya existentes; desplegar la carga útil de los MIRV en misiles distintos de éstos en los silos o submarinos existentes y situar ALCM estratégicos en bombarderos adicionales.

El primer procedimiento que podría seguir la Unión Soviética para tratar de evadir el límite superior impuesto en materia de MIRV/ALCM –la construcción de nuevos silos y submarinos para misiles MIRV– resultaría impracticable por completo, ya que cualquier intento de fraude sobre el número total de tales lanzadores estratégicos puede ser detectado por los Estados Unidos con un alto grado de seguridad.

El segundo sistema por el que los rusos podrían intentar aumentar el límite superior impuesto a sus MIRV/ALCM consistiría en sustituir sus misiles MIRV por otros de diferentes características en sus actuales silos o submarinos. La Unión Soviética dispone actualmente de un cierto número de silos y de submarinos dotados con misiles de tipos diferentes de los MIRV. La detección por parte de los Estados Unidos de este tipo de sustituciones clandestinas requiere conocer cuáles de los misiles rusos son del tipo MIRV y cuáles de los silos y submarinos están dotados con tales misiles.

En las negociaciones SALT II ambos bandos se han puesto de acuerdo en considerar que todos los misiles de cualquier tipo, que hayan sido probados según el sistema MIRV, o hayan sido disparados desde un lanzador con cabeza MIRV, deberán ser incluidos en el cómputo para contabilizar el límite superior admitido para los MIRV. Los Estados Unidos propusieron este sistema de cómputo, precisamente, porque de esta forma facilitaría la verificación. Los investigadores norteamericanos conocen ya, gracias a una observación exhaustiva, cuáles de los misiles que posee actualmente la Unión Soviética pertenecen al tipo transformable en MIRV; de igual forma puede asegurarse que los futuros tipos capaces de ser transformados en MIRV, ICBM y SLBM podrán ser detectados en la fase de pruebas.

Aunque Norteamérica conoce qué misiles rusos son del tipo MIRV, todavía hay una pregunta que permanece sin respuesta: ¿resulta posible distinguir qué silos y qué submarinos están dotados con cada uno de estos tipos de misiles? La respuesta viene dada, de nuevo, por las conocidas diferencias entre los sistemas de misiles. En primer lugar, los silos rusos que contienen misiles transformables en MIRV presentan un aspecto significativamente diferente de aquellos dotados con misiles no transformables. En segundo lugar, los lanzadores MIRV requieren sistemas de mando y control, equipos de apoyo y otras instalaciones diferentes, todo lo cual es perfectamente observable desde los actuales satélites norteamericanos.

Los diversos tipos de tubos lanzadores de misiles con que están dotados los submarinos estratégicos pueden igualmente ser observados e identificados por los satélites de vigilancia de los Estados Unidos. Cualquier intento por parte de los rusos para instalar sus actuales SLBM, de características MIRV, en submarinos dotados con misiles de características diferentes llevaría consigo la necesidad de alterar sus tubos de lanzamiento, de sustituir sus sistemas de control de fuego y de introducir otras modificaciones sustanciales. Esto requeriría su tiempo: incluso una reparación rutinaria en un submarino nuclear necesita de 30 a 36 meses. En estas circunstancias, este tipo de modificaciones resultaría ciertamente fácil de detectar.

Otro método de burlar los límites impuestos sobre misiles de características MIRV consistiría en tomar un misil de tipo diferente y sustituir únicamente su cabeza. Si los rusos tuviesen la intención de desplegar la carga útil de sus MIRV en misiles de características diferentes a los MIRV, existentes en sus actuales silos o submarinos, estas actividades resultarían de muy difícil detección. Afortunadamente hoy en día no existen tales tipos de carga útil intercambiable y la actual generación de misiles rusos posee características que hacen virtualmente imposible la transferencia de la carga útil MIRV desde los nuevos misiles de características MIRV a los antiguos misiles de características diferentes.

Un último método para la posible evasión de los límites impuestos en materia de MIRV sería el basado en situar misiles crucero estratégicos sobre bombarderos adicionales. El tratado señala un límite total de 1320 entre los misiles del tipo MIRV y los bombarderos equipados con ALCM. ¿Podrían los rusos desbordar estos límites produciendo un número de bombarderos ALCM superior al autorizado?

En un futuro no muy lejano, los Estados Unidos estarán capacitados para determinar qué bombarderos rusos se hallan equipados con misiles crucero, ya que los misiles crucero soviéticos están montados al exterior y, por tanto, resultan visibles. Los montajes internos representarían un serio problema para su detección, pero hasta la fecha los rusos no disponen de ninguno. Los misiles crucero de montaje interno serían detectados con mayor facilidad al comienzo del proceso, ya que las aeronaves afectadas tendrían probablemente que ser enviadas a algunas factorías centrales para su modificación y los Estados Unidos siguen muy de cerca las actividades de tales instalaciones.

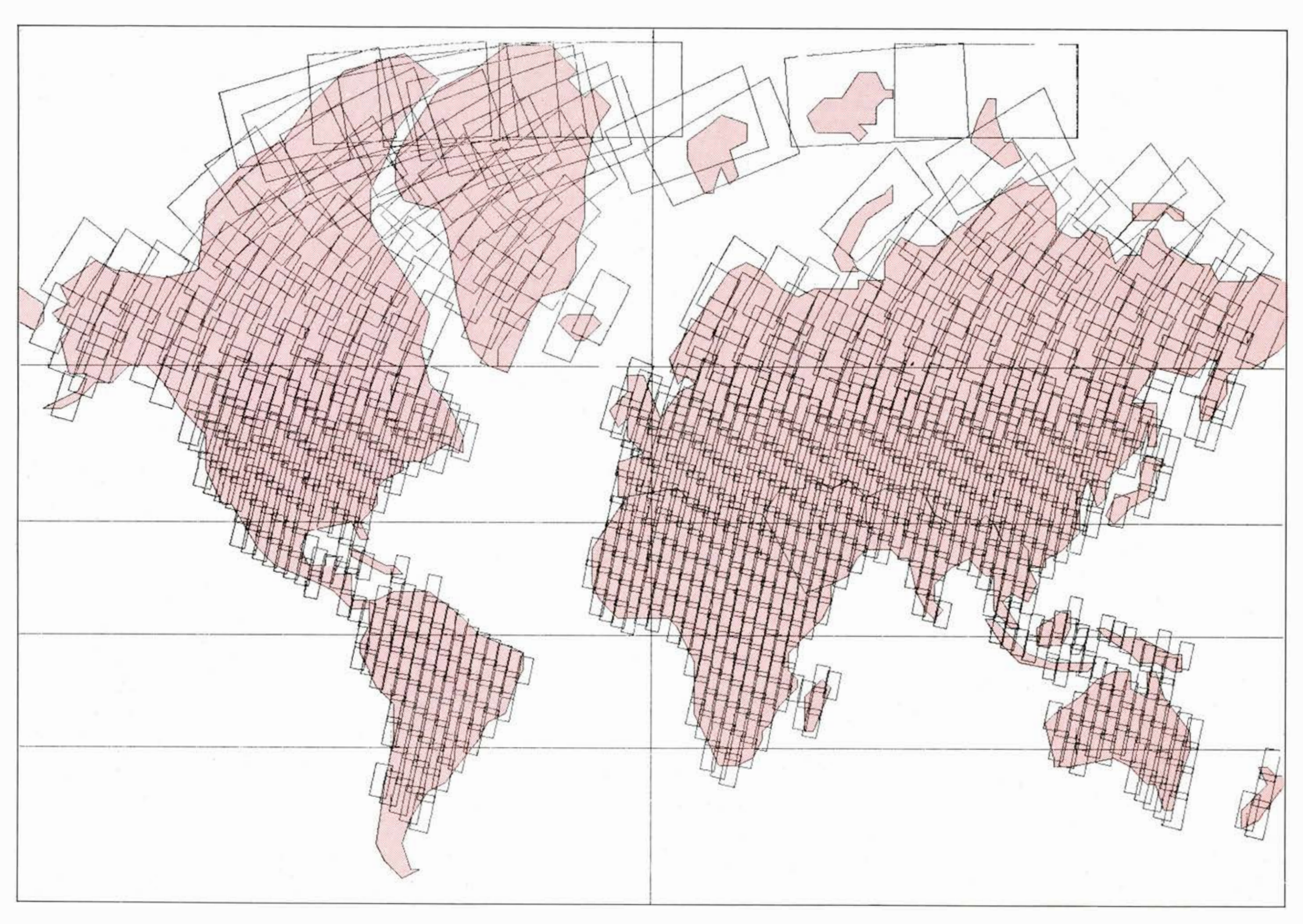
La verificación de los límites impuestos en misiles crucero de instalación interior resultará facilitada considerablemente por la adopción, en el acuerdo SALT II, de una regla "tipo" que declara simplemente que si un bombardero de una clase dada es portador de ALCM, todos los bombarderos de la mencionada clase serán considerados y contabilizados como bombarderos ALCM. Sin embargo, el llevar la cuenta de los bombarderos equipados con misiles crucero no es lo mismo que verificar qué bombarderos son de tipo estratégico. A los bombarderos podría adaptárseles un misil crucero que fuese de corto alcance, lo cual no bastaría para calificarlos como bombarderos armados con misiles crucero estratégicos. También podría do-

tarse a los bombarderos con misiles crucero de gran alcance, pero con carga útil no nuclear. Por consiguiente, un problema distinto y mucho más complicado consiste en determinar si los misiles crucero instalados en bombarderos tienen alcance estratégico (en este caso, más de 600 kilómetros) y cargas útiles estratégicas.

En condiciones normales, los Estados Unidos pueden obtener datos adecuados, aunque no exactos, sobre estas características, pero no existe ningún procedimiento sistemático para la verificación del alcance de los misiles crucero desplegados. No aparecería revelada ninguna diferencia significativa, ni por el exterior del misil, ni en sus pruebas de vuelo.

A diferencia de los misiles balísticos, no es necesario probar los misiles crucero al límite máximo de su alcance, ni siquiera aproximarse al mismo, para que los estamentos militares puedan aceptarlos con confianza en un futuro rendimiento. Al igual que los aviones, pueden ser lanzados por un espacio de tiempo limitado, en condiciones de crucero, y puede calcularse su alcance sobre la base del carburante consumido. Da la casualidad de que la Junta de Jefes de Estado Mayor de los Estados Unidos dispone de buenas estimaciones sobre el alcance de los actuales misiles crucero rusos, y la URSS no cuenta todavía con misiles crucero aire-tierra con alcances estratégicos. Por añadidura, no se espera que los rusos puedan disponer en varios años de muchos ALCM de largo alcance; resulta, pues, poco probable que sean capaces de rebasar las restricciones numéricas señaladas en el tratado SALT II antes de que éste expire en 1985.

Al igual que ocurre con la carga útil de los misiles crucero, no hay ningún procedimiento, por ahora, que nos permita diferenciar un misil crucero con carga nuclear, de otro con carga no nuclear, por simple observación externa. Una vez más, no obstante, tampoco se espera que los rusos puedan disponer en varios años de ALCM de largo alcance, tanto con cabezas nucleares como convencionales; por consiguiente, parece muy poco probable una violación de



COBERTURA MUNDIAL disponible gracias a los actuales satélites empleados en reconocimientos fotográficos militares. Dicha cobertura aparece insinuada en esta composición confeccionada por ordenador y preparada por investigadores de la División de Sistemas Opticos de la Compañía Itek, como consecuencia de la labor desarrollada para el diseño de una nueva cámara fotográfica de gran formato para el Proyecto Nacional de Aeronáutica y de Administración del Espacio. La nueva cámara está diseñada para "colaborar a escala mundial en la exploración y descubrimiento de recursos petrolíferos y minerales, elaboración de cartografía y control mundial del medio ambiente", proporcionando para ello imágenes en blanco y negro y color, "con unas características de cobertura, claridad y fidelidad nunca logradas en el pasado", por medio de sistemas no militares. En una misión típica a gran altura como la representada en esta figura, la Lanzadera del Espacio portadora de la cámara de reconocimiento sería despachada sobre una órbita polar aproximadamente circular desde la Base Vandenberg de las Fuerzas Aéreas en California. Las "huellas" rectangulares aparecen trazadas en 3468 cuadros fotográficos individuales "expuestos en pasadas diurnas sobre una órbita con una inclinación de 97,6 grados respecto al Ecuador, a una altura de 294 millas marinas". (El aumento aparente de los cuadros a mayores latitudes obedece a una distorsión producida como consecuencia de la proyección Mercator elegida por los autores de esta composición.) En condiciones favorables, la totalidad del globo puede ser cubierta en dos vuelos, cada uno de ocho días, realizados por una Lanzadera del Espacio, lo que significa aproximadamente un kilómetro y medio de película contenida en dos cargas de film recuperables. En una misión de este tipo, el detalle fotográfico sería por término medio "superior a los 23 metros (en comparación con los 76,20 metros previstos para las misiones del futuro LANDSAT)". Se cree que la actual generación de satélites militares de reconocimiento fotográfico describen órbitas polares similares, aunque a una altura menor. Además de sus cámaras de gran formato, estos satélites llevan cámaras con "lentes de aproximación", capaces en teoría de obtener fotografías con un detalle de unos 30 cm desde una altura de 100 millas.

este aspecto del tratado antes de la fecha prevista para su expiración.

Incluso suponiendo que los rusos llegasen a perfeccionar sus ALCM estratégicos, los Estados Unidos tampoco se verían en situación de inferioridad. Si los rusos fuesen a comenzar a reajustar sus aviones disponibles con nuevos ALCM, pronto se levantarían indicios sospechosos y los Estados Unidos se darían cuenta de la posibilidad de un fraude. Aun cuando los rusos equipasen uno de sus nuevos bombarderos con ALCM, haciendo afirmaciones falsas sobre su carácter no estratégico y los Estados Unidos no fuesen capaces de contradecir tales afirmaciones, resulta dudoso que se pudiera disponer de más de 120 bombarderos en estas condiciones antes de la fecha de caducidad del tratado.

El tratado SALT II contiene también una limitación en cuanto al número de modernos misiles balísticos pesados (MLBM, del inglés "Modern large ballistic missiles") permitidos a cada bando. Cualquier tipo de misil más pesado que el ruso SS-19 (que posee un "peso de lanzamiento" de alrededor de 3263 kilogramos) es considerado como MLBM; todo misil más pesado que el más pesado de los ICBM actualmente disponibles en los inventarios rusos (el SS-18, con un peso de lanzamiento de aproximadamente 7257 kilogramos) está prohibido. El debate producido acerca de la sustitución de los SS-19 por los SS-11 después de la firma del SALT I proporciona una prueba suficientemente significativa sobre la complejidad de las actuales técnicas de control norteamericanos. La disputa se inició con la cuestión de si la instalación de los SS-19 en silos de SS-11 violaba o no las provisiones establecidas en el SALT I, en relación con la sustitución de misiles pesados por ligeros. El acuerdo a que se llegó, tras el debate, consistió en que la sustitución por parte de los rusos no

PARTE I: TRATADO

DISPOSICION	METODO DE FRAUDE		PROBABILIDAD DE QUE LA ACTIVIDAD PERMANEZCA SIN DETECTAR
1. Tope en el número total de lanzadores (2.400-2.250)	Despliegue de nuevos sistemas estratégicos		Ninguna
	Despliegue incrementado de sistemas ya existentes	SLBM	Ninguna
		Bombarderos	Ninguna
		ICBM	Máximo de 100
	Conversión de sistemas no estratégicos en estratégicos	Nueva producción y despliegue del Backfire	Ninguna
		Empleo de cisternas para abastecimiento de combustible en vuelo de los Backfire	Pequeña
		Perfeccionamiento Backfire en alcance y carga útil	Apreciable
		Perfeccionamiento SS-20 para convertirlos en SS-16	Pequeña
		Conversión de bombarderos transformados	Máximo de 12
2. Tope en ICBM dotados con MIRV más bombarderos armados con ALCM (1.320-1.200)	Construcción de nuevos silos para misiles o de nuevos tubos de lanzamiento submarino		Ninguna
	Sustitución de misiles MIRV por misiles no MIRV en los silos o submarinos existentes		Ninguna
	Despliegue de la carga útil MIRV en misiles no MIRV en los silos o submarinos existentes		Ninguna con los sistemas presentes; posiblemente elevada con los sistemas futuros.
	Colocación de ALCM en bombarderos estratégicos		Ninguna en un futuro próximo; escasa a principios de 1980
3. Tope en MLBM (308)	Conversión de misiles no MBLM en MLBM		Ninguna
4. Prohibición de sistemas de recarga rápida	Despliegue de sistemas de recarga rápida		Ninguna

PARTE II: PROTOCOLO

1. Prohibición de ICBM móviles	Despligue de ICBM móviles	Ninguna
2. Prohibición de misiles crucero estratégicos	Despliegue de misiles crucero en lanzadores con base terrestre o submarina, con alcances superiores a los 600 km.	Ninguna durante el protocolo
3. Limitaciones en nuevos tipos de misiles balísticos	Pruebas en vuelo y despliegue de nuevos tipos de misiles balísticos	Probablemente ninguna

POSIBLES VIOLACIONES de las principales disposiciones del acuerdo SALT II por parte de la Unión Soviética. Tales violaciones pueden clasificarse en tres categorías. En primer término están los numerosos sistemas de realizar un fraude, ante los cuales la capacidad norteamericana para su verificación resulta excelente y las posibilidades de un engaño con éxito por parte de la Unión Soviética son remotas *(recuadros de color claro)*; estas contingencias incluyen todas las áreas en que una violación de importancia apreciable por parte soviética podría trastrocar el actual equilibrio estratégico. En segundo lugar, están las zonas en que la actual capacidad de verificación norteamericana resulta más bien débil, pero en las que las posibles violaciones no son significativas desde un punto de vista militar *(recuadros de tono medio)*. Están, por último, unas muy pocas áreas en las que por el momento no existe un problema serio de verificación, aunque pueden llegar a serlo en la próxima fase de las negociaciones *(color más intenso)*.

había violado la letra del tratado SALT I, pero estaba en contradicción con una de las declaraciones unilaterales hechas a la sazón por los Estados Unidos. El punto central es, sin embargo, el que puso al descubierto la discusión, a saber, que Norteamérica era perfectamente consciente de la mucha mayor potencia del SS-19 con respecto al SS-11.

El tratado SALT II prohíbe también los sistemas de "recarga rápida". El propósito de esta provisión estriba en protegerse contra la posibilidad de que los rusos puedan acumular un stock extra de ICBM y adaptarlos a los lanzadores existentes, una vez efectuada una primera salva de disparos. La carga de un misil de 50 toneladas en un silo es una operación mucho más complicada que introducir un cartucho en un rifle. El complejo equipo alrededor de los silos existentes, necesario para hacer funcionar un sistema de tales características, por no hablar de las instalaciones de almacenamiento para misiles adicionales, resultaría detectable con toda seguridad por los satélites actuales. Los rusos podrían dispersar su equipo y misiles extra, situándolos alejados de los silos y quizá lograran evitar la detección en tanto no se vieran precisados a efectuar pruebas con el sistema resultante. Pero de esta forma no dispondrían de unas posibilidades de "recarga rápida" y, por tanto, no se produciría la violación de esta cláusula en particular.

Además del tratado, vigente hasta 1985, los acuerdos SALT II contendrán un protocolo duradero hasta 1982, y habrá también en este protocolo una serie de puntos de verificación. Una parte del mismo prohíbe el despliegue y las pruebas de lanzadores móviles de ICBM. El peligro de violación de esta cláusula estriba en la posibilidad de un despliegue móvil de los actuales ICBM SS-16; no es probable la aparición de otros tipos de ICBM móviles antes de que el protocolo expire. No existe ninguna duda sobre la capacidad norteamericana para descubrir un posible despliegue soviético de un sistema móvil con base terrestre. Sin embargo, podría resultar en extremo dificultosa la verificación del número actual de misiles desplegados, en el caso de que los rusos pusieran en funcionamiento una serie de programas básicos de decepción, tales como el de objetivos múltiples, o el llamado del "juego de la bomba", opciones ambas que han sido discutidas recientemente (y que incluyen la construcción de cientos, o incluso millares de abrigos, de los que tan sólo una parte ocultan misiles).

El protocolo SALT II prohíbe también las pruebas en vuelo y el despliegue de los misiles crucero con lanzamiento terrestre o marítimo y con alcances superiores a los 600 kilómetros. Como los alcances de los misiles crucero no pueden determinarse con exactitud en el caso de un intento de engaño, la prohibición recogida en esta cláusula no podría ser verificada.

No obstante, las pruebas en vuelo de los misiles crucero de los Estados Unidos apenas si acaban de dar comienzo; no está previsto el despliegue de estas armas en cantidades significativas desde un punto de vista militar hasta después que haya expirado el protocolo SALT II. Los actuales misiles crucero soviéticos son aún de tecnología muy rudimentaria. Norteamérica se encuentra mucho más adelantada en el desarrollo de cabezas compactas, sistemas de guía por ordenador y pequeños motores de turbo-ventilación, es decir, del tipo de tecnología clave en los misiles crucero de tamaño pequeño pero de gran alcance. El Departamento de Defensa de los Estados Unidos ha manifestado que Norteamérica, en todo lo referente a la tecnología de los misiles crucero, se encuentra con diez años de adelanto con respecto a la Unión Soviética y que los misiles crucero norteamericanos actualmente en proceso de desarrollo pertenecen a dos o tres generaciones de adelanto sobre las armas rusas actuales.

Los rusos disponen, sin embargo, de algunos misiles crucero de lanzamiento desde el mar y que superan, por lo menos en 250 kilómetros, el límite impuesto de los 600 kilómetros. No obstante, debido a su diseño rudimentario son de gran tamaño. Puede afirmarse, en resumen, sobre este tema que no existe ningún peligro de una posible violación por parte rusa hasta por lo menos pasado el año 1982, por dos razones principales: primero, que resultaría observable cualquier intento ruso de iniciar nuevos despliegues; segundo, que los rusos no poseen capacidad para llevar a cabo un despliegue de misiles crucero nuevos, de largo alcance, de lanzamiento terrestre o marítimo.

El protocolo SALT II incluirá algunas limitaciones en las pruebas en vuelo y en despliegue de nuevos tipos de misiles balísticos. Aunque una valoración completa de los problemas relacionados con la verificación comprende el análisis detallado de estas limitaciones, existen razones para sentirse optimistas en este punto. Los nuevos misiles balísticos pueden detectarse en la fase de pruebas; una de las violaciones más fáciles de descubrir sería la relacionada con un despliegue adicional de nuevos misiles.

La aptitud de los Estados Unidos para detectar todas las posibles violaciones rusas en torno a los acuerdos SALT II pueden resumirse y agruparse en tres grandes bloques, en razón de sus probabilidades de éxito. En primer término, están los muy numerosos procedimientos fraudulentos, contra los que las posibilidades norteamericanas de verificación resultan excelentes y casi nulas, por tanto, las oportunidades de éxito rusas. En este grupo se engloban la totalidad de los aspectos en que una posible e importante violación por parte de la Unión Soviética podría desnivelar el actual "equilibrio del terror" estratégico: despliegue de nuevas armas estratégicas, incremento (aunque numéricamente no resulte importante) de los bombarderos y SLBM, despligue de ICBM adicionales, tanto en gran escala como a escala moderada, perfeccionamiento del misil SS-20 hasta transformarlo en un arma estratégica (a no ser que su perfeccionamiento se lleve a cabo sin pasar por la fase de pruebas), despliegue de misiles del tipo MIRV, de bombarderos ALCM en un número superior al permitido (en ausencia de sistemas radicalmente diferentes), mejora de los misiles de tamaño más reducido para conseguir misiles más modernos y de mayor tamaño y, por último, introducción de sistemas de recarga rápida.

En segundo lugar, hay varios puntos en los que las posibilidades de verificación norteamericana resultan por el momento bastante discutibles. En todos estos casos, sin embargo, el posible fraude no reviste importancia significativa en términos militares. Los problemas de verificación atañen a la detección de despliegues de escaso relieve de ICBM adicionales, control de las características operativas del bombardero Backfire, verificación de la no existencia de ningún sistema de SS-20 perfeccionado que no haya sufrido la fase de pruebas y verificación de las posibles variantes en un número limitado de bombarderos pesados.

En tercer lugar, hay algunos aspectos, especialmente los relacionados con los misiles crucero y con la carga útil MIRV transferible, en los que Norteamérica puede encontrarse con importantes obstáculos de verificación durante la próxima etapa de la negociaciones SALT. Aunque los misiles crucero rusos son, hoy por hoy, rudimentarios, en algún momento del futuro resultará virtualmente imposible llegar a determinar si el alcance de un misil crucero soviético posee el suficiente alcance para conside-

rarlo de tipo estratégico. Tampoco los Estados Unidos estarán capacitados para averiguar si la carga útil de un misil crucero ruso, de un tipo dado, está compuesta de explosivos convencionales o nucleares. Además, el cómputo relativamente exacto de misiles crucero no va a ser una tarea fácil.

Por el momento, la carga útil de los misiles rusos MIRV difiere tanto de la carga útil de los misiles de cabeza simple, que los MIRV no pueden ser instalados en los misiles antiguos. Si los rusos, a la larga, son capaces de diseñar y desplegar una cabeza transferible, Norteamérica podría enfrentarse con un problema de verificación muy espinoso.

Los temas de los misiles crucero estratégicos y de la carga útil transferible no son problemas de una excesiva magnitud ni gravedad para el período de tiempo que cubren los acuerdos SALT II. Pero con la mirada puesta hacia adelante, en dirección hacia el pacto SALT III a mediados del año 1980, los problemas de verificación se adivinan de una dificultad mucho mayor.

En términos generales, las posibilidades estadounidenses de vigilancia y control, citadas en este artículo, han sido estimadas, casi con certeza, por debajo de su verdadero valor. La razón es que su valoración sólo ha tomado en consideración aquellos métodos de información absolutamente fidelignos; por ejemplo, la fotografía desde satélite. Sin embargo, existe hoy en día una gama muy variada de información recibida por el Servicio de Inteligencia de los Estados Unidos que no puede ser aceptada como cierta por adelantado sin una valoración adecuada. Por ejemplo, el control y la escucha norteamericanos de las comunicaciones y transmisiones internas soviéticas pueden recoger datos sobre ciertas actividades que resultan detectables mediante fotografías desde satélite. Una violación que no haya podido ser detectada por otros métodos podría incluso ser descubierta a través de un refugiado político, cuya defección no podría ser prevista con anterioridad. Los datos obtenidos a través de estas circunstancias fortuitas reducirían sin duda todavía más las posibilidades de éxito de una posible violación.

Las posibilidades de violación han sido también exageradas aquí por el hecho de suponer que la Unión Soviética posee una refinada perfección en el arte del engaño, lo cual se asume, como factor constante, en la evaluación de las posibilidades y capacidad propias. Sin embargo, puede no tratarse de una suposición realista, ya que hasta los planes mejor trazados por una nación que intente montar una operación de engaño pueden resultar frustrados.

Tomemos por ejemplo el conocido caso histórico en el que la Unión Soviética intentó el desarrollo de una importante cobertura de armas estratégicas en Cuba, antes de la crisis de los misiles, en octubre del año 1962. Aunque los rusos pretendieron ocultar el emplazamiento de sus misiles ofensivos en Cuba, fueron absolutamente incapaces de triunfar en su intento. En diversas ocasiones los procedimientos operativos de rigor y los controles rutinarios necesarios en el funcionamiento normal de cualquier organización importante y que normalmente suelen pecar de falta de flexibilidad, traicionaron sus planes, poniéndolos al descubierto. Para lograr el éxito en un fraude de este tipo, todo debe funcionar a la perfección. En la vida real, sin embargo, cualquier acontecimiento imprevisto puede echar por tierra los planes cuidadosamente establecidos. No se puede contar con que cualquier plan determinado fracase, pero tampoco se puede contar con que no ocurra, ya que sería temerario.

Ya se produjo un áspero debate en los Estados Unidos al considerar las posibles violaciones de los acuerdos SALT I por parte soviética. Dicha experiencia ha levantado no pocos interrogantes acerca de las intenciones soviéticas en relación con el cumplimiento de los actuales tratados, aunque no se haya manifestado ninguna duda sobre la capacidad norteamericana para controlar y vigilar lo que estén haciendo los rusos. En realidad, la auténtica base en que se apoyan los alegatos en torno a que se hayan o no producido violaciones son los detallados informes que los servicios de inteligencia de los Estados Unidos han reunido en relación con las actividades rusas desde que se firmó el pacto SALT I. El punto central del debate ha sido, no lo que los rusos han hecho, sino el significado de sus acciones. Si los soviéticos se habían empeñado en actividades ilegales que hubiesen permanecido ocultas, por supuesto que hubiesen surgido dudas acerca de la capacidad norteamericana para detectar dichas actividades; pero nadie ha insinuado siquiera que éste pudiese ser el caso.

Hasta ahora, sólo hemos considerado las posibilidades de tipos de violación que hubiesen permanecido sin detectar. Otro aspecto igualmente importante es el de si los rusos intentarían un engaño en el supuesto de que pudieran salir triunfantes en su empeño. La posibilidad de violaciones es pequeña; la probabilidad de éxito en el empeño aparece todavía más remota.

En primer lugar, el entramado de las SALT II proporciona un marco muy amplio para que ambos bandos puedan proseguir sus programas estratégicos sin necesidad de intentar un fraude. Aunque los rusos estuviesen capacitados para organizar unos efectivos sustancialmente más importantes si no existieran las limitaciones de las SALT II, bajo la protección de este tratado pueden igualmente conseguir muchos objetivos. Pueden desechar sus misiles actuales y sustituirlos por otros modelos más dignos de confianza y más precisos. Pueden incrementar de forma muy apreciable sus inventarios de misiles de cabeza múltiple. Pueden realizar un mayor esfuerzo en áreas no prohibidas por las SALT II, como puede ser la guerra antisubmarina, que podría llegar a convertirse en una auténtica amenaza para los Estados Unidos.

En segundo lugar, aun en el caso de que los rusos no quedasen satisfechos tras la firma y ratificación de los acuerdos SALT II, no sería absolutamente necesario que tuviesen que lanzarse por el camino de las violaciones. Algunas alternativas podrían serles tan atractivas o más; por ejemplo: intentar una renegociación en algunas de las cláusulas, tratar de conseguir la modificación de los términos del pacto SALT II en las nuevas negociaciones para el SALT III, renunciar a alguna o algunas de las partes del tratado (o incluso retirarse del tratado en su totalidad), modificar parcialmente sus programas para acomodarlos al contenido del tratado, y otras más.

En tercer término está la cuestión de qué beneficios cosecharían los rusos de un fraude. La Unión Soviética no lograría ninguna ventaja de tipo político, a no ser que hicieran públicas sus transgresiones. A nadie intimida unas armas cuya existencia desconoce. Aunque los rusos diesen publicidad a sus violaciones, las repercusiones políticas podrían ser enormes. El Gobierno norteamericano, por ejemplo, podría verse forzado a realizar una escalada sin precedentes en la historia del armamento en respuesta a las demandas y presiones de un sector público presa de la excitación.

Los peligros reales derivados de las violaciones rusas del tratado SALT II surgirían si produjesen unas ventajas significativamente importantes desde el punto de vista militar, como, por ejemplo, en el caso de que los rusos, después de estar realizando un fraude durante algunos años, pudiesen mostrar en consecuencia una superioridad tan devasta-

dora que forzase a los Estados Unidos a una rendición inmediata. Pero esto resulta imposible. Bajo las condiciones de los acuerdos SALT II, los Estados Unidos tendrán todavía a su disposición un formidable arsenal estratégico: casi 2000 lanzadores y aproximadamente 10.000 cabezas independientes. Para desnivelar este "equilibrio del terror" estratégico, los rusos precisarían de un número mucho más elevado de armas que las que les están permitidas y les resultaría imposible la adquisición de un número de armas adicionales suficiente sin intentar un fraude de escala tan vasta y ostensible que acabaría por quedar descubierto.

Resulta de utilidad considerar algunos de los "casos más desfavorables" posibles mediante los cuales la Unión Soviética podría conseguir un fraude real en alguna de las cláusulas SALT II sin ser detectado. Podría, por ejemplo, lograr un incremento clandestino de su arsenal estratégico añadiéndole hasta 100 lanzadores ICBM, pero ello sólo representaría un aumento de un 5 por ciento en su potencial de lanzadores, lo que no supondría ninguna ventaja apreciable. Los rusos disponen de casi 2500 misiles y bombarderos. Bajo los auspicios del pacto SALT II, estos totales deberán reducirse hasta un tope máximo de 2250, con una disminución de aproximadamente 250. De esta forma, los resultados de un fraude quedarían más que compensados por la reducción de fuerzas impuesta por el tratado.

Los rusos podrían estar también en condiciones de distraer algunos Backfire, orientándolos hacia misiones estratégicas en caso de guerra. Esta sustitución les permitiría mejorar de forma parcial sus fuerzas de ataque de segundo escalón, pero limitaría su capacidad antisubmarina y disminuiría también su potencial contra sus enemigos fronterizos, todo lo cual no sería de ningún modo un buen negocio desde su punto de vista.

Los rusos podrían disponer en estos momentos de un potencial considerable de SS-20 mejorados, no sometidos a prueba. Pero aun cuando este potencial fuera una realidad, los misiles SS-16 resultantes serían menos precisos y de menor potencia que la actual generación de ICBM. La orientación de los SS-20 hacia misiones de ataque intercontinental disminuiría las amenazas de ataque contra Europa Occidental y China.

Los rusos podrían transformar algunos de sus aviones navales en bombarderos de largo alcance. De nuevo, ello incrementaría de forma parcial su poder de represalia estratégica, a la vez que disminuiría de forma apreciable la amenaza contra las fuerzas navales norteamericanas.

La Unión Soviética podría desarrollar también su capacidad de recarga no rápida y no sometida a prueba. Los beneficios resultantes de disponer de un lanzador recargado (en el mejor de los casos) 12 horas después de haber hecho fuego son discutibles; el silo podría ser destruido en el intervalo y, para entonces, es probable que el misil recargado no fuese ya más que un "muñeco de paja".

En otras palabras, incluso en el caso de que los rusos intentasen un fraude en cada uno de los aspectos que pudiesen pasar inadvertidos, sólo conseguirían aumentar de forma muy modesta su potencial estratégico, mientras que su potencial militar quedaría reducido en otros aspectos.

Para recapitular, el éxito en los resultados de los acuerdos depende en parte fundamental de la capacidad de los Estados Unidos para verificar el cumplimiento soviético de lo estipulado en las SALT II. Sin embargo, en estrecha relación con lo anterior, resulta evidente que los tan mencionados problemas de verificación son más aparentes que reales. Los múltiples, diversos y duplicados sistemas de detección a disposición de los Estados Unidos son más que suficientes para descubrir cualquier intento de engaño de envergadura necesaria y suficiente para que representen una amenaza militar para nuestro país. Los rusos podrían conseguir éxito en algunas pequeñas violaciones del tratado sin ser detectados, pero un puñado de misiles o bombarderos adicionales añadirían demasiado poco a su arsenal para que resultase militarmente importante. En el campo de la política, los rusos se verían expuestos a perder más de lo que podrían ganar si intentasen violar el más importante tratado bilateral que pueden realizar con una potencia extranjera.

Será en el futuro cuando los problemas de verificación pueden volverse críticos. Los avances tecnológicos, en especial aquellos relacionados con los misiles crucero y con el tema de la carga útil transferible en los MIRV, harán mucho más apremiantes la necesidad de un control adecuado recíproco por ambos bandos, una vez que expiren el tratado y el protocolo SALT II. El enfrentarse con estos problemas en la etapa de unos futuros acuerdos SALT III puede imponer una reducción muy apreciable en los actuales niveles de confianza y seguridad en la detección de posibles violaciones. En este punto, será necesaria una completa revisión de la política y métodos de verificación.

Cómo respiran los huevos de las aves

Los embriones de las aves captan oxígeno y liberan dióxido de carbono por difusión a través de poros microscópicos de la cáscara del huevo. El proceso está regulado por la geometría de los poros, que varía de una especie a otra

Hermann Rahn, Amos Ar y Charles V. Paganelli

El huevo de las aves es un sistema vital autosuficiente para el embrión del ave en desarrollo. Todos los nutrientes, minerales, fuentes de energía y agua utilizados por el embrión durante su incubación, están ya presentes en el huevo recién puesto, de modo que el huevo requiere únicamente el calor de los padres y movimientos periódicos para evitar la adhesión del embrión a las membranas de la cáscara. No obstante, el huevo carece de un requisito crucial: el oxígeno, que alimenta la maquinaria metabólica de las células embrionarias de modo que éstas puedan ejecutar las complejas maniobras del desarrollo. ¿Cómo respira el huevo, captando oxígeno de la atmósfera circundante y liberando dióxido de carbono, el producto de desecho de la respiración celular?

El intercambio gaseoso se suele asociar con la inhalación periódica de un medio fluido (aire o agua) que lleva oxígeno a los capilares de los pulmones o de las branquias y que, con cada exhalación, extrae dióxido de carbono del órgano respiratorio. Los pulmones o las branquias son accionados por medio de músculos, siendo determinada su frecuencia de bombeo por la demanda metabólica y controlada por el sistema nervioso. Sin embargo, los huevos de las aves y otros organismos (tales como los insectos, arañas, anfibios y reptiles) no presentan movimientos respiratorios y no hay corrientes de aire dentro del huevo que puedan transportar oxígeno a los capilares del embrión en crecimiento. En su lugar, el huevo "respira" por difusión a través de millares de poros microscópicos de la cáscara.

La existencia de estos poros fue demostrada por primera vez en 1863, sin la ayuda del microscopio, por John Davy, miembro de la Royal Society de Edimburgo. Colocó un huevo en un jarro de agua y con una bomba de vacío extrajo el aire situado por encima de la superficie del agua. Observó que se formaban pequeñas burbujas de gas en la superficie del huevo y dedujo que había diminutas aberturas en la cáscara.

El gas pasa a través de los poros por el proceso pasivo de difusión: la tendencia que tiene una alta concentración de moléculas de pasar a un área de concentración más baja. La difusión tiene lugar en virtud de la energía cinética de las moléculas de gas, y no necesita el gasto directo de la energía metabólica por parte del embrión; la concentración inferior de oxígeno dentro del huevo hace que nuevas moléculas de oxígeno pasen, a través de los poros, hacia el interior procedentes del exterior, donde la concentración es más alta. A la inversa, la concentración de dióxido de carbono dentro del huevo hace que las moléculas se difundan hacia el exterior, donde en principio no hay ninguna. Estos procesos de difusión están controlados por el área de poro disponible en la cáscara, la longitud de los poros y las diferencias de concentración de los gases que difunden a través de la cáscara.

El contenido en agua del aire dentro del huevo es mayor que el del aire del exterior, de manera que los poros también permitirán la salida de moléculas de agua (que son más pequeñas que las moléculas de oxígeno). Los animales han desarrollado muchas adaptaciones especializadas para conservar el agua, pero los huevos de las aves parecen diseñados para perderla a un ritmo controlado. La mayor parte de la energía necesaria para el desarrollo embrionario se toma de las reservas grasas de la yema; por cada gramo de grasa quemado se genera una masa casi igual de agua metabólica. Por tanto, el contenido relativo de agua del huevo aumentará durante la incubación, a no ser que el agua se pierda. Si el contenido relativo de agua en el momento de la eclosión iguala el del huevo recién puesto, debe perderse en forma de agua alrededor de un 15 por ciento de la masa inicial del huevo. Como bien saben los criadores de aves de corral, esta pérdida de agua es esencial para una eclosión feliz.

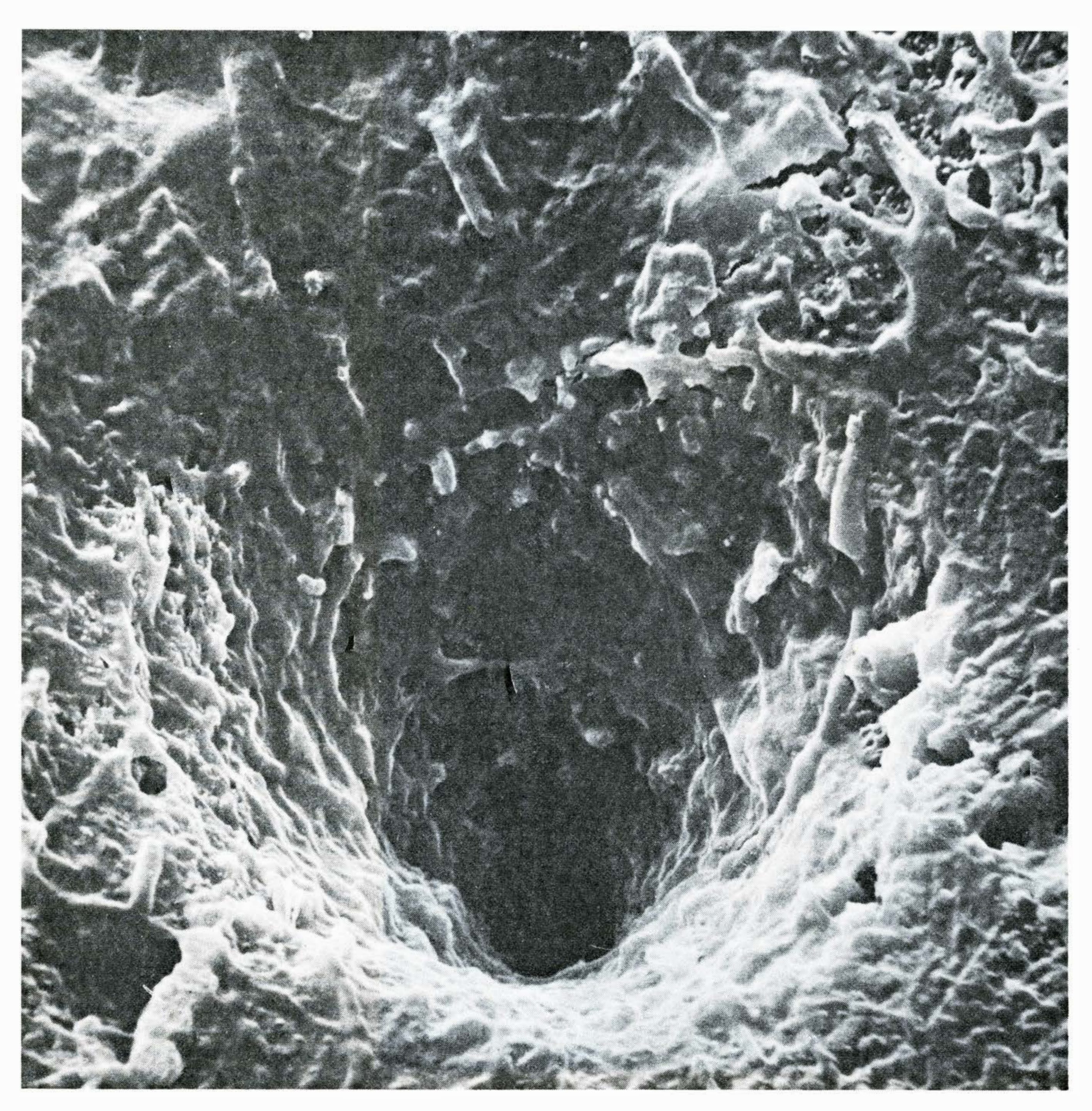
Durante los 21 días de su incubación, un huevo de gallina típico de 60 gramos de peso, tomará unos seis litros de oxígeno y expulsará 4,5 litros de dióxido de carbono y 11 litros de vapor de agua. Debido a la pérdida de agua, el huevo pesará sólo 51 gramos después de 21 días de incubación y el polluelo recién salido pesará unos 39 gramos (sin contar el peso de la cáscara y de las membranas respiratorias). Las investigaciones en nuestros laboratorios y en otros se han dirigido a dilucidar los mecanismos de difusión responsables de esta transferencia de gases.

Las tres capas del integumento del huevo –la cáscara y las dos membranas subyacentes– deberían ser familiares a cualquiera que alguna vez haya pelado un huevo pasado por agua. Las tres capas son depositadas en menos de 24 horas al bajar la célula huevo desnuda por el oviducto de la gallina hacia la glándula de la cáscara o útero [véase "How an Eggshell Is Made", por T. G. Taylor; SCIENTIFIC AMERICAN, marzo, 1970]. La propia cáscara del huevo tiene una capa más externa llamada cutícula (falta en algunas especies), que es una

lámina muy fina de material orgánico, a menudo agrietada poniendo al descubierto la superficie de la verdadera cáscara. Esta consta de carbonato cálcico segregado, que forma cristales columnares de calcita, incorporando una pequeña cantidad de materia orgánica. El empaquetamiento imperfecto de los cristales de calcita deja espacios entre ellos que atraviesan el espesor de la cáscara, dando lugar a los poros microscópicos.

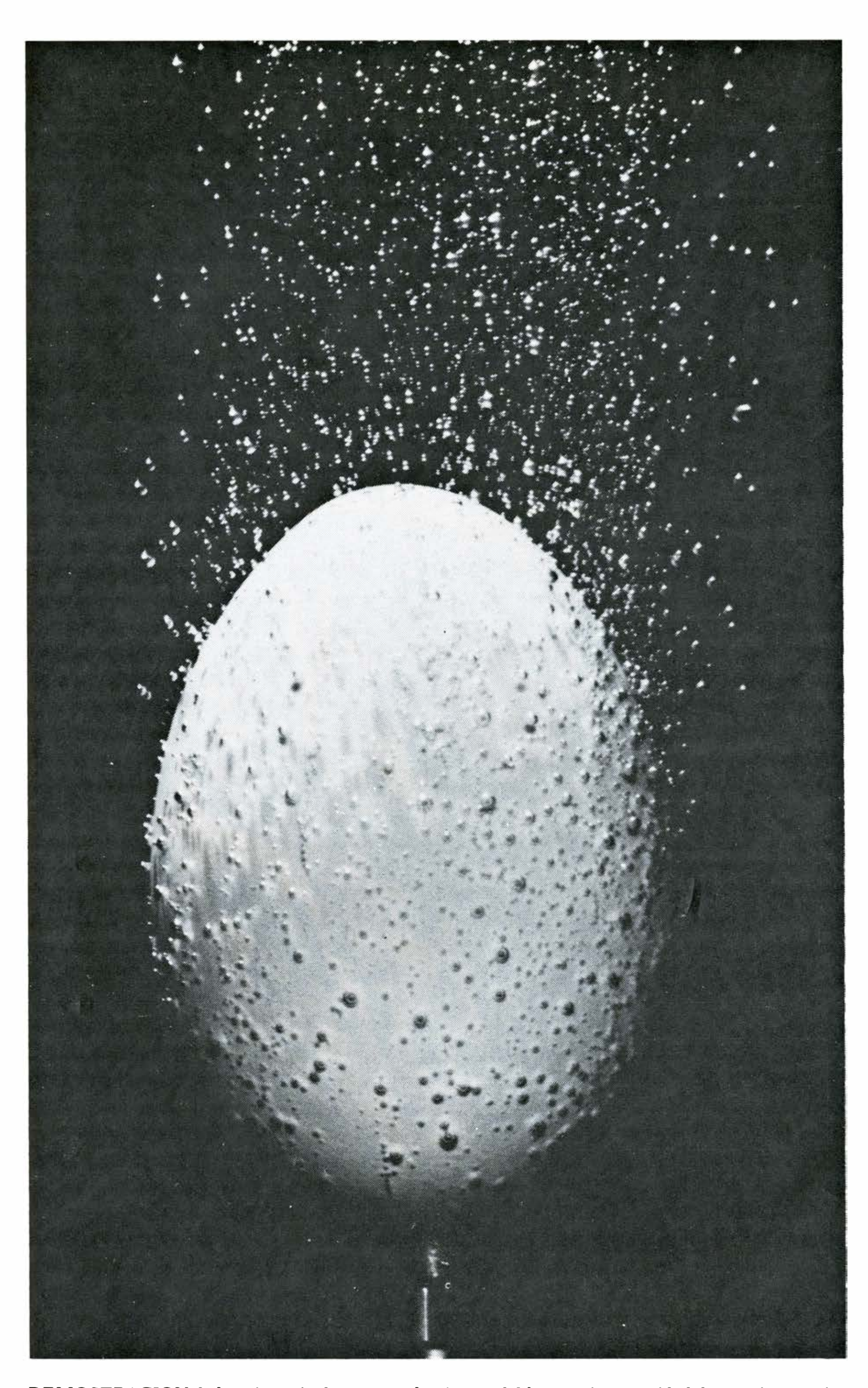
Las membranas externa e interna de la cáscara constan de una red de fibras orgánicas. Las fibras de la membrana externa de la cáscara están unidas a la cara interior de la cáscara del huevo mediante conos mamilares, los centros de cristalización de la cáscara del huevo durante su formación. Las dos membranas difieren por el diámetro de las fibras, tosquedad del tejido y grosor total. La cara interior de la membrana interna está forrada por una fina "película" que parece ser más bien continua y no una simple prolongación de las fibras. Una vez puesto el huevo, los espacios entre las fibras de las dos membranas no tardan en llenarse de gas.

Los poros de la cáscara del huevo constituyen el único camino para la comunicación gaseosa entre el medio exterior y las membranas embrionarias. De forma cilíndrica, sus aberturas están cu-



PORO EN LA CASCARA DEL HUEVO del cuco (*Cacomantis merulinus*) de Java aumentado 3800 veces en esta microelectrografía de barrido. La abertura cónica del poro se estrecha formando un tubo cilíndrico de unos pocos micrometros de diámetro que atraviesa completamente la cáscara. El oxígeno atmosférico entra en el huevo y el dióxido de carbono metabólico lo abandona por difusión pasiva a través de miles de poros similares distribuidos por la superficie del huevo. Esta imagen de la abertura del poro tan limpia es poco corriente; en la mayoría de huevos, los poros están ocultados por sustancias orgánicas segregadas o material inorgánico. Microelectrografía de J. H. Becking, del Instituto holandés para las Ciencias Atómicas en Agricultura.

biertas a veces por material particulado segregado, orgánico o inorgánico. Un cuidadoso ataque a la cáscara con ácido seguido de una tinción muestra los poros a simple vista: el huevo de gallina típico tiene unos 10.000 distribuidos en su superficie. Las dimensiones y número de los poros se determinan en la glándula de la cáscara antes de que el huevo sea puesto; después, permanecen inalterados. Como veremos, la forma, tamaño y número de los poros en la cáscara del huevo varían según las especies de aves; y es el conjunto geométrico de los poros lo que determina la capacidad de difusión de la cáscara del huevo.

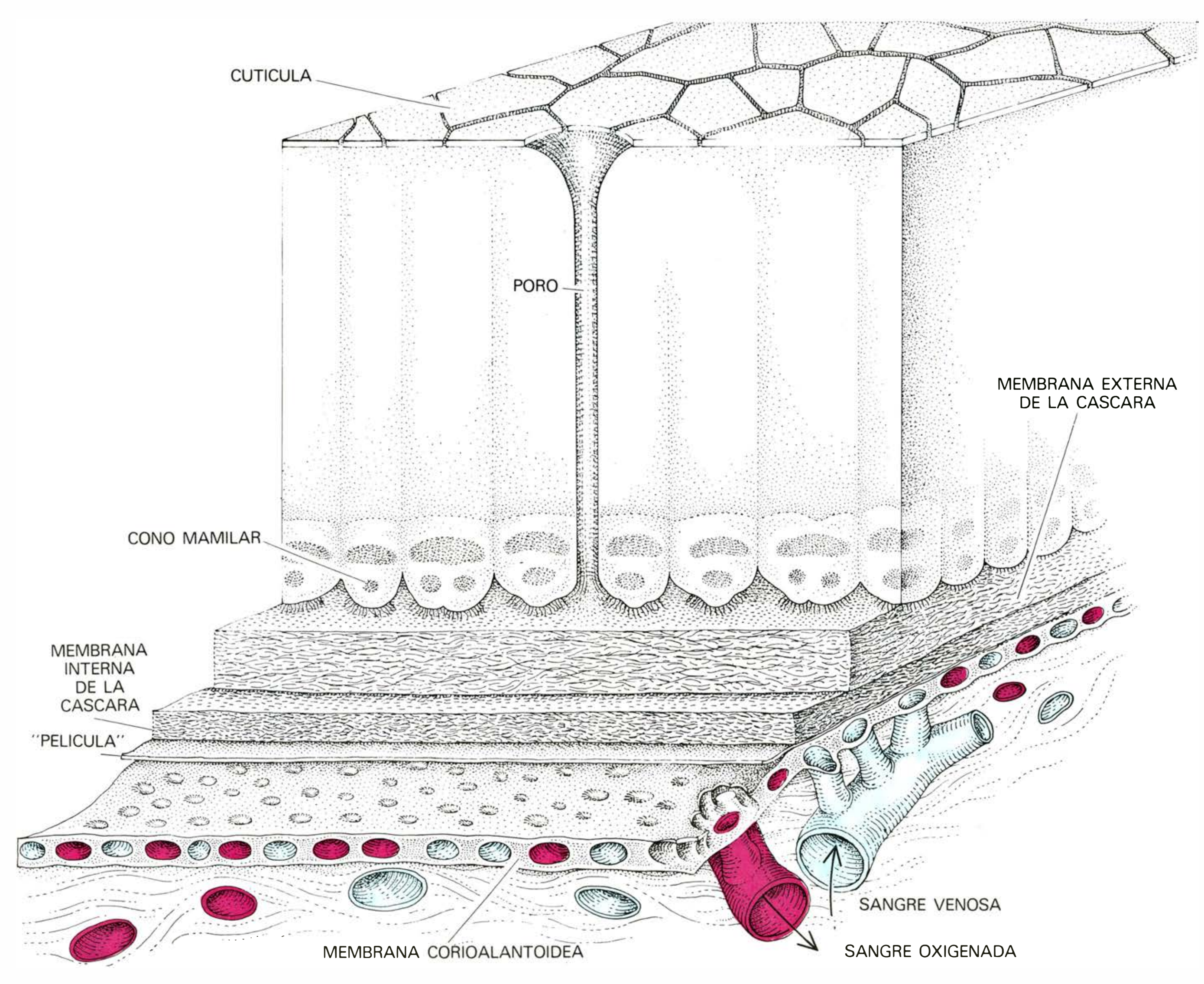


DEMOSTRACION de la existencia de poros en la cáscara del huevo, sin necesidad de un microscopio. Puede conseguirse esta demostración inyectando aire a presión en la cámara de aire en el extremo romo de un huevo de gallina. Las burbujas salen de toda la superficie del huevo, indicando que contiene miles de diminutas aberturas. Los poros constituyen el único camino para la comunicación gaseosa entre el medio exterior y las membranas embrionarias. Experimento similar al llevado a cabo primero por John Davy de Edimburgo en 1863. Fotografía de Dennis R. Atkinson, Universidad estatal de Nueva York en Buffalo.

Dado que el embrión del ave no puede controlar directamente su intercambio de gases, la permeabilidad o conductancia gaseosa de la cáscara y de las membranas debe ajustarse con precisión para satisfacer las necesidades metabólicas del embrión. Si la conductancia gaseosa es demasiado alta, las necesidades de oxígeno del embrión estarán ampliamente satisfechas, pero se perderá demasiada agua, provocando la deshidratación. Si la conductancia gaseosa es demasiado baja, o bien el embrión se asfixiará por falta de oxígeno, se intoxicará con su propio dióxido de carbono o se ahogará en su propia agua metabólica. Debe alcanzarse un equilibrio apropiado que proporcione presiones óptimas de gas en el embrión y que asegure una pérdida limitada de agua del huevo.

El huevo pierde agua a un ritmo constante, pero la captación de oxígeno aumenta considerablemente en el transcurso de la incubación. En el polluelo, los primeros 18 días de incubación se denominan período prenatal. Durante los días cinco y seis, el corioalantoides (órgano respiratorio del embrión, análogo a la placenta de los mamíferos) se extiende desde el embrión, tomando contacto con la película continua que forra la membrana interna y estableciendo una red de capilares. El día nueve, el corioalantoides ha invadido alrededor de la mitad de la superficie interna de la cáscara y, hacia el día 12, ha cubierto completamente la superficie interna. (Las membranas externa e interna de la cáscara están situadas entre el corioalantoides y la cáscara del huevo propiamente dicha.)

Durante el período prenatal, se intercambian el oxígeno y el dióxido de carbono a través del corioalantoides y el vapor de agua se pierde continuamente. Al ser rígida la cáscara, el gas entra para reemplazar el agua perdida y forma una cámara de aire en el extremo más romo del huevo. La cámara de aire aumenta paulatinamente de tamaño hasta ocupar un 15 por ciento del volumen interno del huevo al final de la incubación. El gas que ocupa la cámara de aire está en comunicación con el gas que se encuentra entre las fibras de las membranas interna y externa. Esta continuidad puede demostrarse inyectando aire a presión en la cámara de aire bajo el agua, haciendo que se escapen las burbujas de aire por los poros en toda la superficie del huevo. Las tensiones del gas en la cámara de aire son casi idénticas a las de los espacios aéreos de las membranas



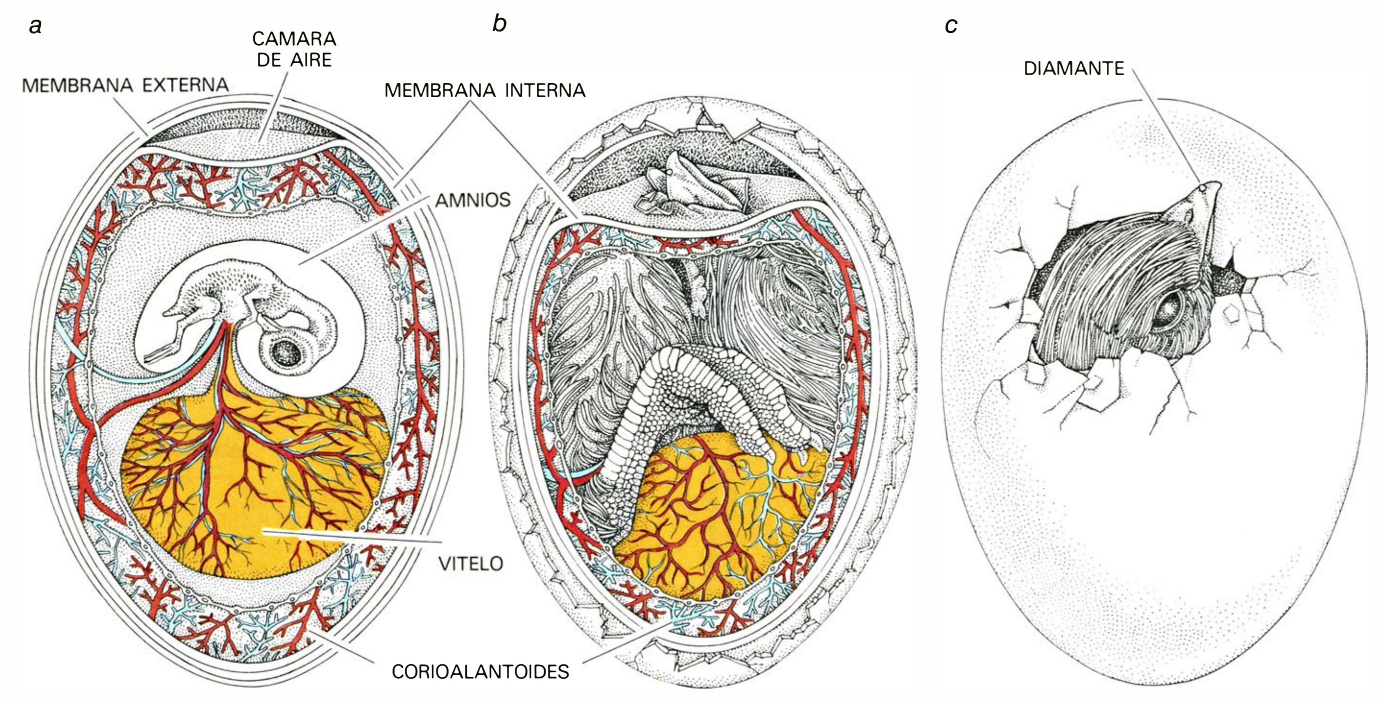
LAS CAPAS MAS EXTERNAS del huevo que participan en el intercambio gaseoso se muestran en esta sección transversal que corresponde a un grosor de unos 0,4 milímetros. La capa más externa de todas es la cutícula, una delgada lámina orgánica. Bajo ella está la cáscara propiamente dicha, formada por columnas de cristales de calcita y atravesada por poros. Los poros terminan en la membrana externa, laxa y fibrosa; la membrana externa difiere de la interna por el diámetro de las fibras, la basteza del tejido y el espesor total. La muy fina superficie interna de la membrana interna, denominada "película", es muy probablemente una lámina continua. Unido a la película está el corioalantoides (órgano respiratorio del embrión), que es análogo a la placenta de los mamíferos. La sangre venosa (*azul*), bombeada por el corazón embrionario, fluye hacia la membrana corioalantoidea, donde se carga con el oxígeno que ha difundido a través de los poros. La sangre oxigenada (*rojo*) se desplaza entonces hacia el tejido embrionario. Simultáneamente, el dióxido de carbono abandona la sangre venosa por difusión. Las membranas externa e interna de la cáscara están entre el corioalantoides y la cáscara.

de la cáscara; de ahí que la cámara de aire constituya un dispositivo adecuado para sacar muestras de los gases que hay en el interior del huevo.

El consumo de oxígeno del embrión aumenta lentamente durante la primera semana y media de incubación. Entre los días 10 y 14 se registra un rápido incremento para alcanzar una meseta de 600 mililitros de oxígeno por día inmediata a la eclosión. Este valor es la cantidad máxima de oxígeno que puede obtenerse por difusión pasiva a través de los poros fijos de la cáscara. Seiscientos mililitros de oxígeno por día quizá no resulten impresionantes para el lector (que consume esta cantidad en dos minutos), pero el tráfico molecular a través de los 10.000 poros de la cáscara es considerablemente intenso. Cada segundo, una cantidad neta de unos 20 billones (20×10^{12}) de moléculas de oxígeno fluyen hacia el interior del huevo a través de cada poro y 14 billones de moléculas de dióxido de carbono y 12 billones de moléculas de vapor de agua fluyen hacia el exterior.

Sin embargo, los rigores de la eclosión requieren más oxígeno del que puede proporcionar la simple difusión. ¿De dónde viene el oxígeno adicional? La naturaleza ha aportado una simple solución para este problema: el día 19, aproximadamente, el polluelo penetra con su pico en la cámara de aire del extremo más romo del huevo, proceso llamado rotura interna. El polluelo empieza entonces a respirar de la cámara de aire, ventilando sus pulmones por primera vez. La rotura interna es un acontecimiento crucial: permite hinchar los pulmones del polluelo y sus sacos aéreos, de modo que el oxígeno es transportado a los pulmones por convección o flujo masivo. El período de respiración activa en la cámara de aire dentro de los confines del huevo intacto se llama período paranatal, ya que el corioalantoides prosigue su función. Durante este período, pues, el oxígeno es suministrado tanto por difusión como por convección.

Unas seis horas después de que el polluelo haya penetrado la cámara de aire,



PASO A LA RESPIRACION ACTIVA durante los 21 días del período de incubación del embrión de pollo; tiene lugar en dos fases. Los primeros 18 días del desarrollo constituyen el período prenatal (*a*). A partir del día cinco, el corioalantoides sobresale del embrión y cubre la membrana interna de la cáscara con una red de capilares que suministran oxígeno al embrión y extraen el dióxido de carbono. El vapor de agua también difunde continuamente hacia el exterior del huevo; el agua líquida perdida es reemplazada por gas para formar una cámara de aire en el extremo romo del huevo. El período paranatal (*b*) empieza el día 19, cuando el embrión penetra en la cámara de aire con su pico, un proceso llamado rotura interna. El embrión empieza entonces a respirar de la cámara de aire, hinchando sus pulmones y sacos aéreos por primera vez, aunque el corioalantoides todavía continúa funcionando. Seis horas más tarde, el polluelo rompe la cáscara atravesándola con el diamante de la punta de su pico superior (*c*) y empieza a respirar aire atmosférico. La función corioalantoidea empieza a desvanecerse. (Ilustración basada en una de Hans-Rainer Duncker, de la Universidad de Giessen.)

PERIODO PRENATAL | PARANATAL | POSTNATAL
TRANSPORTE DE OXIGENO DIFUSION | DIFUSION Y CONVECCION | CONVECCION
ROTURA INTERNA
ROTURA EXTERNA
ECLOSION
PULMON
CAPTACION DE OXIGENO (MILILITROS POR DIA)
1,200
1,000
800
600
400
200
0
CAPTACION COMBINADA
CORIOALANTOIDES
PULMON
CORIOALANTOIDES Y PULMON
0 4 8 12 16 18 | 4 8 12 16 20 0 4 8 12 16 20 24
DIAS
DIA 19° HORAS DIA 20°

CONSUMO DE OXIGENO por parte del embrión de pollo; dicho consumo aumenta considerablemente a medida que avanza la incubación. El aumento es gradual durante la primera semana y media, pero entre los días 10 y 14 el consumo de oxígeno aumenta bruscamente. En los días 19 y 20 hay un paso gradual del intercambio gaseoso por difusión a través del corioalantoides a respiración activa a través de los pulmones. Al tiempo que el polluelo sale del huevo, sus pulmones están ya trabajando eficientemente. Esta gráfica está basada en un trabajo de A.H.J. Visschedijk, de Utrecht.

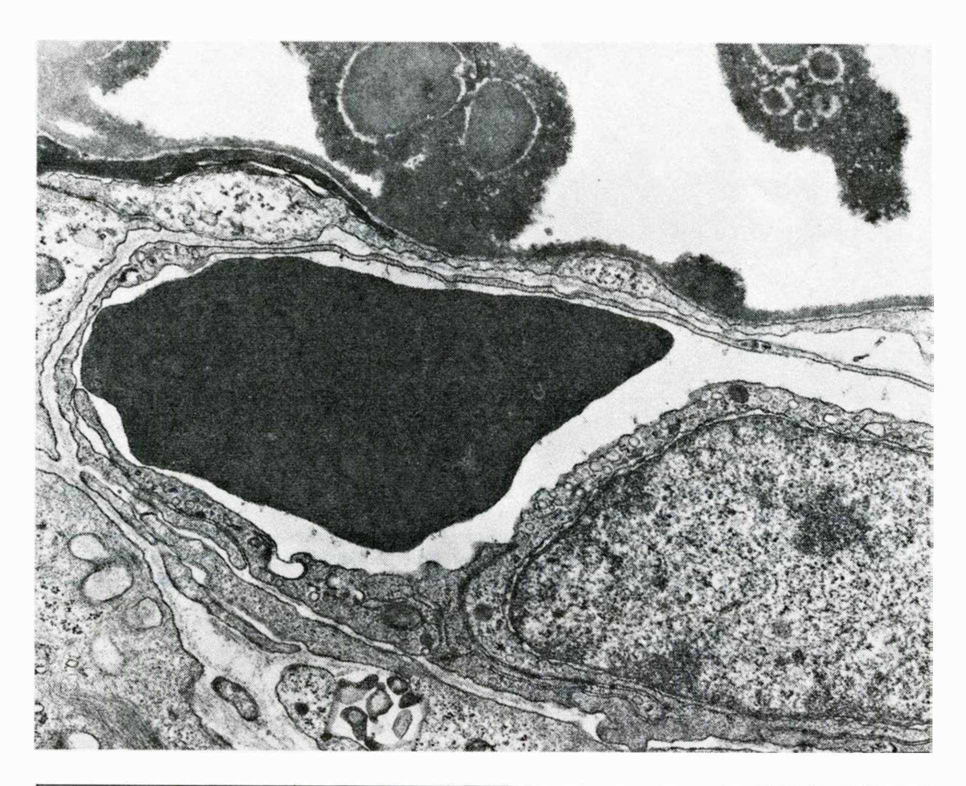
rompe la cáscara; esto es, hace un pequeño agujero con el diamante del pico superior y respira aire atmosférico por vez primera. En estos momentos, la función pulmonar está suficientemente establecida para permitir el importante aumento en el consumo de oxígeno necesario para el esfuerzo final de la eclosión. Al propio tiempo, la función corioalantoidea empieza a desvanecerse, aunque persiste hasta el final, cuando se abandonan las membranas respiratorias quedando ceñidas al interior de la cáscara en el momento en que el polluelo emerge, empezando así el período postnatal. La suave transición de transporte pasivo de gases a transporte activo se realiza entre 24 y 36 horas.

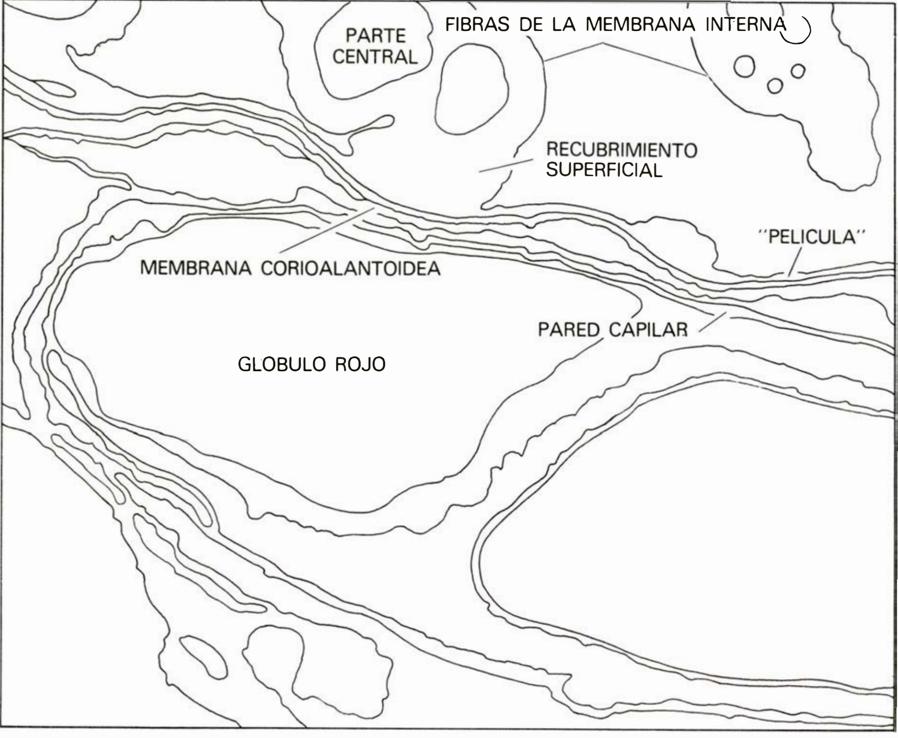
Se sabe ahora que el flujo de oxígeno desde la atmósfera a los capilares sanguíneos del corioalantoides está regulado por una serie de barreras para la difusión: la cáscara y las membranas interna y externa de la cáscara. Los fisiólogos de la respiración expresan la permeabilidad de una membrana con respecto a un gas en términos de su conductancia: lo recíproco a su resistencia a la difusión. Las presiones parciales de los gases respiratorios se expresan comúnmente en torr, o milímetros de mercurio, siendo un torr igual a 1/760 de la presión atmosférica estándar (la presión parcial conjunta de todos los gases de la atmósfera a nivel del mar, incluyendo el nitrógeno, el oxígeno y el dióxido de carbono).

Hay una caída de unos 100 torr entre la presión parcial del oxígeno en la atmósfera (154 torr) y la de la sangre recientemente oxigenada del corioalantoides (58 torr). No obstante, una presión de oxígeno de 58 torr en la sangre es casi suficiente para saturarla de oxígeno, que es transportado a todos los tejidos del embrión. La sangre venosa que vuelve del embrión tiene una presión de oxígeno de 22 torr. Pasa a través del corioalantoides, donde se carga con oxígeno recién difundido a una presión de 58 torr. A la inversa, la presión parcial de dióxido de carbono cae de 47 torr en la sangre venosa a 38 torr en la sangre oxigenada.

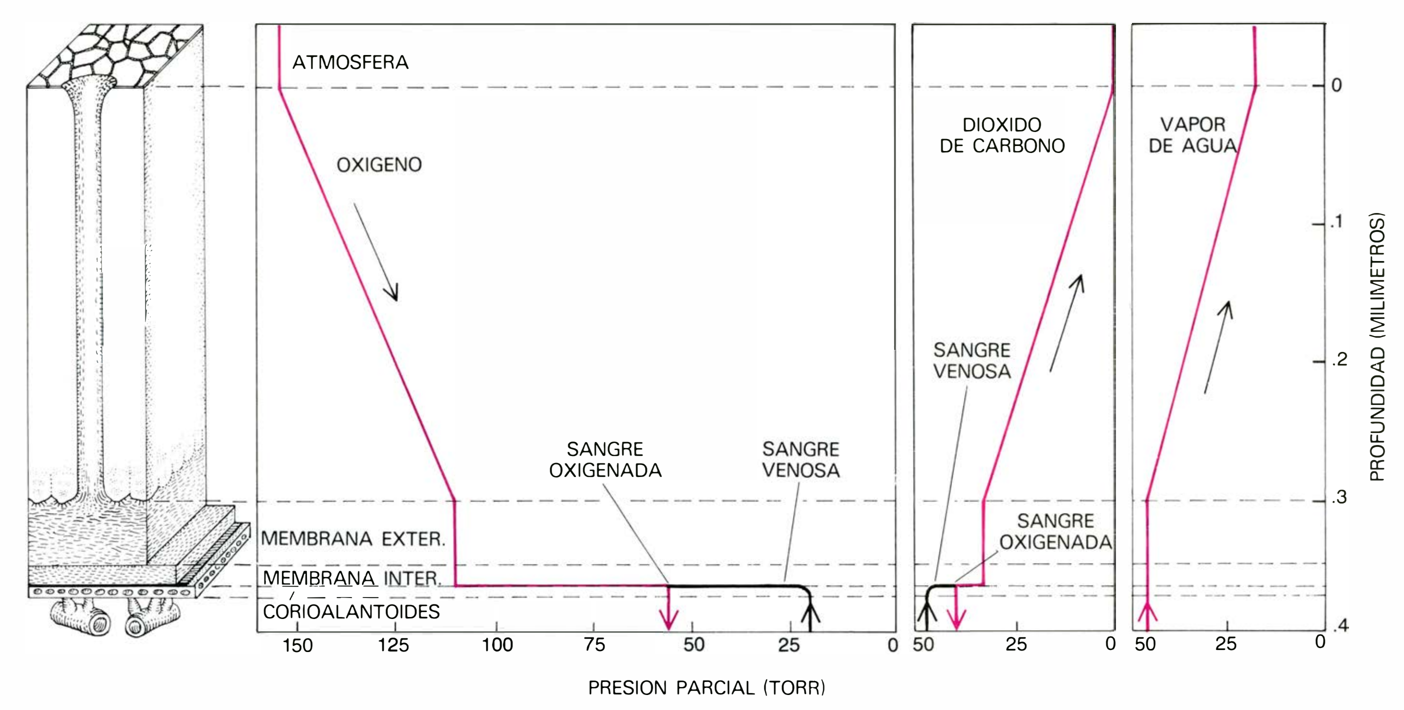
Resultó ser extremadamente difícil medir la conductancia gaseosa entre la membrana interna y el corioalantoides, pues las presiones parciales de los gases en la cámara de aire y en la sangre oxigenada deben medirse simultáneamente. Este problema experimental fue resuelto por Hiroshi Tazawa, de la Universidad de Yamagata, con quien trabajaron dos de los autores el pasado año en el laboratorio de Johannes Piipper, en el Instituto Max Planck de Medicina Experimental de Göttingen.

Con el fin de medir las presiones parciales del oxígeno y del dióxido de carbono en el huevo, Tazawa pegó a la cáscara, encima de la cámara de aire, una jeringa hipodérmica parcialmente llena de aire, de modo que el aire de la jeringa estaba en contacto directo con el gas de la cámara de aire. En un período de unas pocas horas, las presiones parciales de oxígeno y de dióxido de carbono en la jeringa y en la cámara de aire se equi-





INTERFASE que separa la membrana interna de la cáscara y el corioalantoides, según puede apreciarse en esta microelectrografía. En la parte superior se ven en sección algunas fibras de la membrana interna de la cáscara, cubiertas por un material esponjado. La línea continua bajo las fibras es la fina película que forra la membrana interna, a la que se adhiere la membrana más externa del corioalantoides. El objeto irregular oscuro que aparece en el centro es un glóbulo rojo visto en sección oblicua. Esta imagen, tomada a 18.400 aumentos, fue registrada por Ewald Weibel, de la Universidad de Berna.



PERFIL DE LAS PRESIONES GASEOSAS a través de la cáscara y de las membranas respiratorias correspondiente a un huevo de pollo de 18 días de edad, inmediatamente antes de la rotura interna. Las distintas capas constituyen una serie de barreras para la difusión que difieren considerablemente en su conductancia. Una gran diferencia de presiones gaseosas a través de una capa significa que tiene una conductancia baja; una diferencia pequeña significa que la capa tiene una conductancia alta. Las gráficas indican que tanto el poro como la película tienen una conductancia baja para el oxígeno; sólo el poro tiene una conductancia baja para el dióxido de carbono. Una conductancia demasiado alta deshidrataría el huevo del ave.

LONGITUD DE LOS POROS (MILIMETROS)
2.0
1.8
1.6
1.4
1.2
1
.8
.6
.4
.2
0
AVESTRUZ
NANDU
CISNE
ANSAR
KIWI
GALLINA
TINAMU
PETI-ROJO
COLIBRI

FORMA DE LOS POROS de la cáscara, que cambia al aumentar el tamaño del huevo. La longitud de los poros va desde los dos milímetros en el huevo de avestruz hasta 0,04 mm en el de colibrí. La ilustración se basa en los moldes de poros obtenidos por Cyril Tyler y K. Simkiss en Reading.

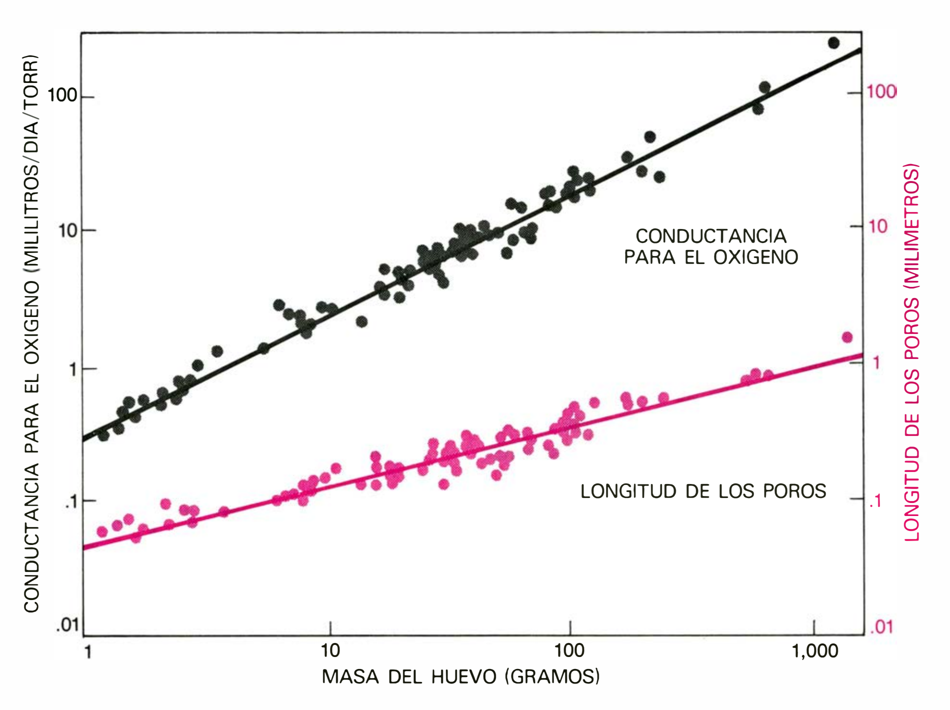
libraron. Al analizar las presiones parciales de los gases en la jeringa, pudimos determinar las de la cámara de aire. Para medir las presiones gaseosas en la sangre oxigenada, Tazawa abrió un pequeño agujero en la cáscara del huevo e implantó un catéter, o tubo de plástico, ultrafino en el vaso sanguíneo corioalantoideo que lleva sangre oxigenada al embrión. Se extrajo simultáneamente el aire de la jeringa y una muestra de sangre oxigenada, determinándose sus niveles de oxígeno y de dióxido de carbono.

Con esta técnica Tazawa encontró que la presión parcial de oxígeno en la cámara de aire es de unos 50 torr más alta que la de la sangre oxigenada, mientras que la presión del dióxido de carbono es 2,5 torr más alta en la sangre oxigenada que en la cámara de aire. El hecho de que haya una diferencia de 50 torr en la presión de oxígeno entre el gas de la cámara de aire y la sangre, requiere una explicación. Es poco probable que los espacios llenos de aire normalmente presentes entre las fibras de la membrana interna de la cáscara sean los responsables.

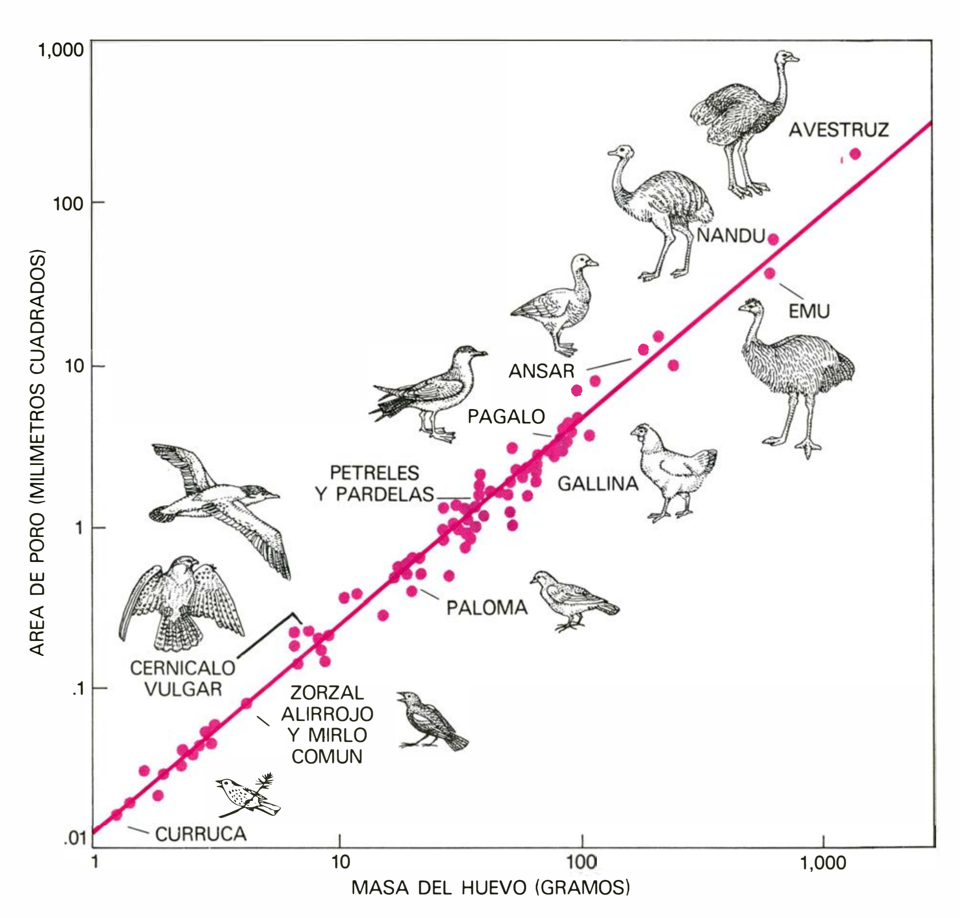
La diferencia puede estar ocasionada en parte por la resistencia a la difusión del film continuo y fino que hay entre la membrana interna de la cáscara y el epitelio corioalantoideo. Otra posibilidad es que parte de sangre venosa (con su baja presión de oxígeno de 22 torr) evite los capilares donde tiene lugar el intercambio gaseoso y se mezcle con sangre completamente oxigenada, disminuyendo en consecuencia su presión de oxígeno a 58 torr. Por supuesto, pueden darse ambos fenómenos.

En resumen, cuando se sigue la presión parcial de oxígeno desde la atmósfera a la sangre oxigenada que abandona el corioalantoides del polluelo, se encuentran sólo dos áreas donde existen grandes diferencias en la presión de oxígeno: la cáscara propiamente dicha y la membrana interna de la cáscara. La cáscara sola, sin embargo, es responsable de casi toda la diferencia de presión parcial tanto del dióxido de carbono como del vapor de agua.

Ante la tarea de diseñar un sistema de intercambio gaseoso eficiente, los fisiólogos respiratorios intentarían lógicamente llevar al máximo la conductancia para el oxígeno. En el huevo, no obstante, tales consideraciones puramente respiratorias deben estar equilibradas con otros factores importantes para la supervivencia del embrión. Estos factores incluyen la necesidad de una cáscara suficientemente gruesa para proporcionar protección mecánica al embrión, para evitar



LONGITUD DE LOS POROS y conductancia para el oxígeno. Una y otra aumentan a diferente ritmo al crecer la masa del huevo, como se muestra en este gráfico que incluye datos de los huevos de unas 90 especies procedentes de diferentes partes del mundo. Por cada diez veces de aumento de la masa, la conductancia para el oxígeno de la cáscara crece 6,5 veces, pero la longitud de los poros aumenta sólo 2,7 veces. La longitud de los poros aumenta quizá más despacio porque la cáscara del huevo debe ser lo suficientemente delgada para que el embrión pueda, llegado su momento de desarrollo, eclosionar.



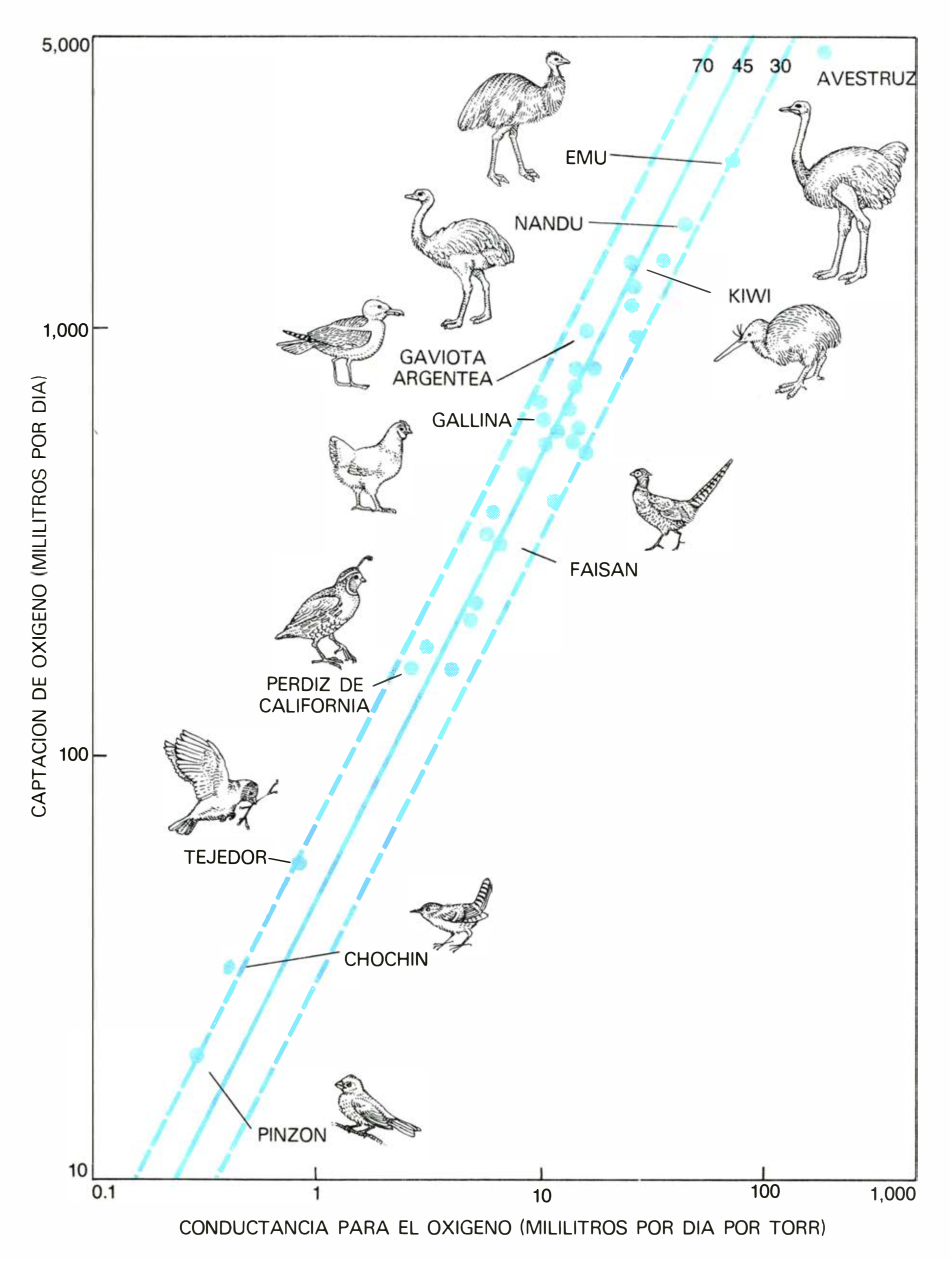
AREA TOTAL DE PORO, que es la suma de todos los poros disponibles para la difusión. Dicha superficie aumenta casi 18 veces por cada diez veces de aumento de la masa del huevo. Por ejemplo, la fracción del área total de la cáscara ocupada por poros salta del 0,02 por ciento en el huevo de gallina al 0,2 por ciento en el huevo de avestruz. El rápido aumento del área de poro con el incremento de la masa del huevo explica el hecho de que la conductancia para el oxígeno (relación entre el área de poro total respecto a la longitud de los poros) aumente 6,5 veces por cada diez veces de aumento de la masa.

que bacterias perjudiciales invadan el huevo, para conservar los líquidos esenciales y para mantener la adecuada presión de dióxido de carbono con el fin de conservar un equilibrio ácido-base normal.

Conocidos algunos de los principios que gobiernan el intercambio gaseoso en el huevo de la gallina, tuvimos curiosidad por algunas de las otras 8500 especies de huevos de aves que cubren un amplio abanico de formas y tamaños. El huevo más pequeño que se conoce, puesto por una de las 150 especies de colibrí, pesa un cuarto de gramo; son necesarios 240 de estos huevos para igualar el peso de un sólo huevo de gallina de 60 gramos. En el otro extremo de la escala está el huevo de *Aepyornis*, la recientemente extinguida ave elefante de Madagascar, que tenía un peso promedio de nueve kilogramos, equivalente a 150 huevos de gallina. La cáscara sola del huevo de *Aepyornis* pesaba dos kilogramos, más que el peso fresco de un huevo de avestruz entero, que con sus 1,5 kilogramos es el mayor huevo puesto por un ave viviente.

¿Cómo difieren en forma y dimensión los poros en los huevos grandes y pequeños? Cyril Tyler y K. Simkiss, de la Universidad de Reading, contestaron esta pregunta impregnando cáscaras de huevo en plástico y disolviendo luego las cáscaras, obteniendo con ello moldes microscópicos de los poros. Estos moldes han demostrado que los poros varían ampliamente de forma, incluso dentro de una misma especie. Nos interesamos asímismo por otros aspectos de la respiración de los huevos de diferentes especies. Por ejemplo, ¿cómo varía la conductancia gaseosa de la cáscara según el tamaño del huevo? ¿Hay alguna relación entre el tamaño del huevo y la concentración de oxígeno en la cámara de aire al final de la incubación? ¿Cómo varía el consumo de oxígeno en función del tamaño del huevo? Y, finalmente, ¿cómo se relaciona la pérdida de agua con el tamaño del huevo y la duración de la incubación?

Sabiendo que el intercambio gaseoso a través de la cáscara se realiza enteramente por difusión, tratamos primero de desarrollar un método para medir la conductancia gaseosa en huevos intactos, que fuera lo suficientemente sencillo para utilizar en laboratorios de campo. La solución a este problema fue proporcionada por las leyes sobre la difusión publicadas en 1855 por Adolph Fick, profesor de fisiología en Zurich y más tarde en Würzburg. Fick tuvo el acierto de comprobar que la descripción matemática del flujo térmico en sólidos, desarrollada 30 años antes por Jean-Baptiste Fourier, podía igualmente aplicarse a las moléculas que difunden a través de sólidos, líquidos o gases.



DIFERENCIA DE PRESION DE OXIGENO entre la cámara de aire y la atmósfera, que es casi la misma en huevos de diferentes tamaños y formas. La diferencia de presión de oxígeno fue calculada a partir de esta gráfica, la cual relaciona, para 28 especies de aves, el consumo de oxígeno del embrión antes de la rotura interna con respecto a la conductancia de la cáscara para el oxígeno. Las pendientes de las líneas discontinuas representan las diferencias de la presión de oxígeno de 70 y 30 torr, respectivamente. La mayoría de los puntos experimentales caen dentro de estos límites; el valor promedio es de 45 torr. La presión de oxígeno en la atmósfera es de 150 torr, de modo que la presión de oxígeno en la cámara de aire antes de la rotura interna es de 105 torr (un torr equivale a 1/760 de la presión atmosférica estándar.)

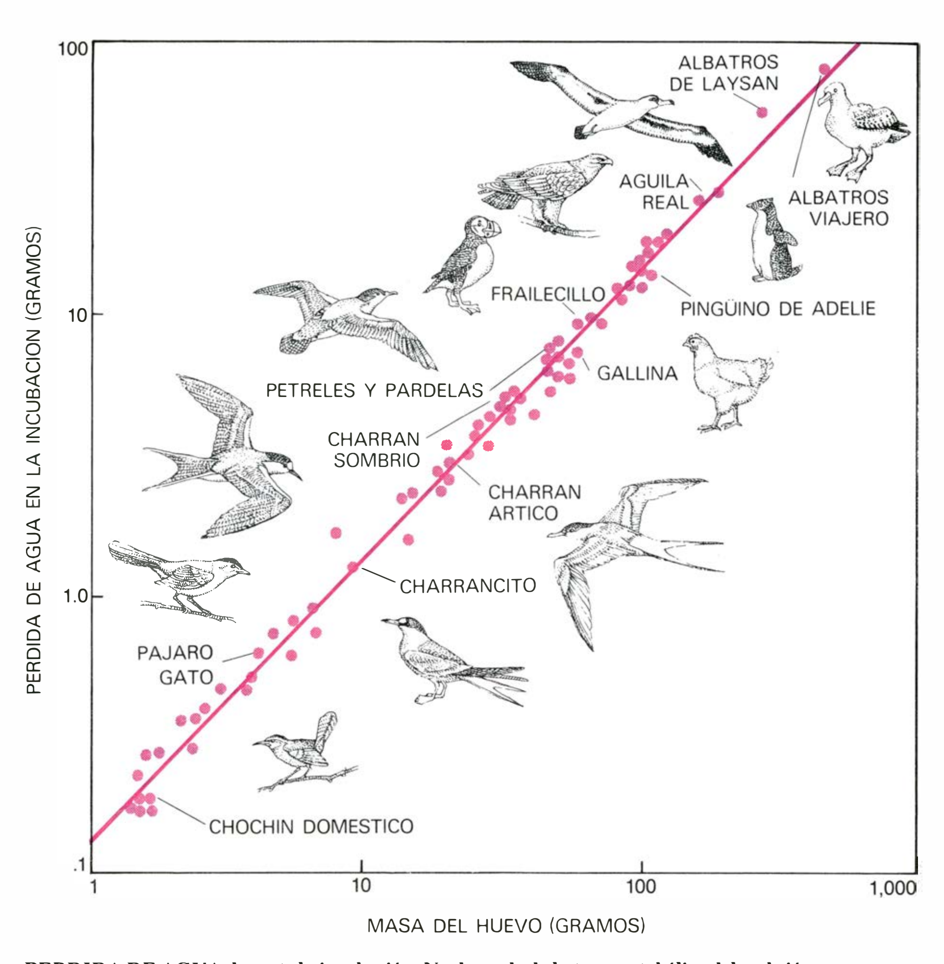
El movimiento de un gas por difusión a través de una barrera permeable depende del movimiento al azar de las moléculas del gas y de la diferencia de su concentración a un lado y otro de la barrera. Al ser las colisiones entre las moléculas del gas más frecuentes en un gas concentrado que en uno diluido, las moléculas tenderán a desplazarse del lado de mayor concentración hacia el lado de menor concentración.

Una versión simplificada de la ley de Fick de la difusión establece que la cantidad de un gas dado que difunde por unidad de tiempo a través de los poros de una cáscara de huevo será directamente proporcional al área de poro disponible para la difusión y a la diferencia entre la concentración del gas que difunde en un extremo del poro y la concentración en el otro extremo. Por otro lado, la velocidad de difusión será inversamente proporcional a la longitud de la

vía de difusión (en este caso, la longitud de los poros que atraviesan la cáscara del huevo). En otras palabras, la conductancia gaseosa de la cáscara depende de la relación entre el área de poro y la longitud de los poros. Duplicando el área disponible para la difusión de un gas o duplicando la diferencia de concentración de este gas a través de la cáscara, se duplicará la velocidad de paso, mientras que duplicando la longitud de los poros se reducirá a la mitad la velocidad de paso, suponiendo que permanecen constantes los demás factores. Así, si se pudiera medir el flujo de un gas, dividiéndolo por la diferencia de concentración de este gas a través de los poros, se podría calcular la conductancia de la cáscara para este gas.

Después de probar varios métodos para medir la conductancia de la cáscara, dimos finalmente con uno muy simple. Si los huevos se mantienen en un desecador a temperatura constante y sólo se sacan un momento una vez al día a efectos de pesaje, pierden peso a un ritmo que permanece constante durante muchos días. Esta pérdida de peso es el resultado, únicamente, de la difusión de vapor de agua a través de los poros de la cáscara hacia la atmósfera seca del desecador.

Dividiendo la pérdida diaria de peso por la presión de vapor de agua entre el interior del huevo y el ambiente, se obtiene la conductancia de la cáscara para el vapor de agua. Dado que la vía de difusión a través de la cáscara para el oxígeno y el dióxido de carbono es la misma que para el agua, la conductancia para el vapor de agua puede convertirse en conductancia para el oxígeno. Es relativamente fácil determinar así la conductancia para el oxígeno: los únicos instrumentos necesarios son un desecador, unas balanzas de precisión y un termómetro. Si se añade un calibrador a este utillaje, se puede medir el espesor de la cáscara, que es equivalente a la longitud de los poros. Conocidas la conductancia y la longitud de los poros, podemos calcular, en virtud de la ley de Fick, el área de poro total funcional: la suma de todos los poros individuales disponibles para la difusión de los gases. (En el huevo de gallina los 10.000 poros tienen una sección transversal suma de dos milímetros cuadrados.)



PERDIDA DE AGUA durante la incubación. No depende de la tasa metabólica del embrión, aunque parece ser esencial para una feliz eclosión. Aquí se ha relacionado la cantidad total de agua perdida durante la incubación con la masa inicial del huevo. La gráfica incluye datos obtenidos de 65 especies de huevos de un tamaño que oscila entre uno y 500 gr, con períodos de incubación que oscilan entre 11 y 70 días. Hay una tendencia notablemente persistente: al margen de la masa del huevo o el tiempo de incubación, el huevo típico perderá el 15 % de su masa inicial durante la incubación natural. Para que el huevo pierda la cantidad de agua requerida, la presión de vapor en el microclima del nido debe hallarse a unos 15 torr.

Durante los últimos siete años hemos determinado, junto con otros, la conductancia de cientos de huevos recién recolectados en diversas partes del mundo. Los huevos, con una masa que variaba entre uno y 1500 gramos, se obtuvieron de 90 especies y 15 órdenes de aves. Hemos observado de una manera constante que la conductancia gaseosa de los huevos aumenta con el tamaño del mismo. Se esperaba esta tendencia porque la demanda de oxígeno del embrión antes de la rotura interna es mayor en los huevos grandes que en los pequeños. La tasa de aumento no es, sin embargo, directamente proporcional a la masa del huevo: por cada diez veces de aumento de la masa hay sólo un aumento de 6,5 veces de la conductancia para el oxígeno.

Una segunda observación interesante es que, con cada aumento de diez veces la masa del huevo, la longitud de los poros aumenta sólo 2,7 veces. Esta tendencia puede quizás explicarse en términos de un equilibrio de factores adaptativos que operan en el transcurso de la evolución. El grosor de la cáscara (que determina la longitud de los poros) está establecida para resistir las tensiones gravitacionales del contenido del huevo y el peso del progenitor que lo incuba, pero el espesor está también limitado por la necesidad que tiene el embrión de romperla durante la eclosión. Esto último explica problablemente por qué la cáscara del huevo no aumenta su espesor de forma directamente proporcional al tamaño del huevo.

¿Cuáles son las consecuencias estructurales de una conductancia gaseosa que aumenta 6,5 veces y de una longitud de poro que aumenta 2,7 veces por cada diez veces de aumento de la masa del huevo? La ley de Fick establece que el área de poro funcional total es directamente proporcional al producto de la conductancia gaseosa por la longitud de los poros. El área de poro aumentará por tanto unas 18 veces (exactamente 6,5 x 2,7) por cada diez que aumente la masa del huevo. Por ejemplo, un huevo de ñandú de 600 gramos, con una cáscara unas tres veces más gruesa que la de un huevo de gallina de 60 gramos, tendrá un área de poro total unas 18 veces mayor.

Podemos apreciar ahora que los ele-

mentos estructurales de la cáscara (área de poro y longitud de los poros) determinan su conductancia gaseosa, una propiedad funcional que puede relacionarse con las necesidades metabólicas del embrión y la diferencia de presión de oxígeno a través de la cáscara. Aquí nuevamente la ley de Fick nos da la relación cuantitativa entre estas variables: la diferencia de la presión de oxígeno a través de la cáscara es igual al consumo de oxígeno del huevo dividido por la conductancia de la cáscara para el oxígeno.

Tomemos como ejemplo un huevo hipotético cuya conductancia para el oxígeno sea de 10 mililitros por día por torr (esto es, 10 mililitros de oxígeno difunden a través de la cáscara cada día por cada torr de diferencia de presión de oxígeno). Si el huevo consume 500 mililitros de oxígeno por día, la diferencia de presión de oxígeno a través de la cáscara debe ser de 50 torr. Dado que la presión parcial de oxígeno en la atmósfera es de unos 150 torr, la presión parcial de oxígeno en la cámara de aire del huevo (a la que está expuesta la sangre del embrión) será de 100 torr, aproximadamente el 14 por ciento.

Con el fin de investigar la relación entre la conductancia de la cáscara y el metabolismo del embrión, comparamos el consumo de oxígeno del huevo, justo antes de la rotura interna, con la conductancia para el oxígeno de la cáscara en 28 especies [*véase la ilustración de la página 24*]. La lista de valores conocidos para el consumo de oxígeno de los huevos de muchas especies, grandes y pequeños, se amplió grandemente gracias a los trabajos de tres investigadores de la Universidad de California en Los Angeles, Donald F. Hoyt, David Vleck y Carol Vleck. Conociendo el consumo de oxígeno de los huevos y la conductancia de las cáscaras, pudimos utilizar la ley de Fick para calcular la presión de oxígeno en la cámara de aire. Encontramos que el valor era aproximadamente el mismo para las 28 especies: alrededor de 105 torr de oxígeno, el 15 por ciento. Este valor fue verificado por muestreo directo de la cámara de aire en 13 especies. Además, el valor medido de dióxido de carbono en la cámara de aire daba un promedio de 35 torr, un cinco por ciento.

Estos valores para el oxígeno y el dióxido de carbono en la cámara de aire justo antes de la rotura interna son casi idénticos a los encontrados en los pulmones de las aves adultas. Por tanto, la conductancia para el oxígeno de la cáscara parece corresponderse con la captación de oxígeno por el huevo para "anticiparse" a la demanda de oxígeno del embrión antes de la rotura interna, y proporcionar a la cámara de aire las presiones de oxígeno y dióxido de carbono características del ave adulta. A. H. J. Visschedijk, de la Universidad de Utrecht, ha sugerido que estas presiones gaseosas inician el acto final de la eclosión y preparan al embrión para su existencia postnatal [*vease la ilustración inferior de la página 20*].

Es destacable el hecho de que la conductancia gaseosa de la cáscara del huevo esté calibrada según la masa del embrión para proporcionar casi las mismas concentraciones finales de oxígeno y dióxido de carbono en huevos de distintos tamaños. El esquema general para la porosidad y función de la cáscara es aún más impresionante si se considera que el período de incubación de los huevos de las aves puede variar desde 11 días en algunas de las especies más pequeñas a 70, o más, para los huevos de las aves tubinares, como el albatros viajero.

No hemos considerado en detalle todavía la pérdida de agua del huevo, que tiene lugar a un ritmo constante a lo largo de la incubación. La pérdida de agua en cualquier huevo dado es independiente de la tasa metabólica y, sin embargo, parece ser necesaria para una feliz eclosión. La razón para ello no se comprende totalmente, pero puede estar relacionada con el estado de hidratación del embrión.

Rudolf Drent, de la Universidad de Groningen, fue el primero en señalar que la tasa diaria de pérdida de agua durante la incubación natural está relacionada con la masa del huevo. Examinando los datos en la literatura biológica, se demostró que, en 45 especies de aves, la tasa diaria de pérdida de agua aumenta 5,6 veces por cada diez veces de aumento de la masa del huevo. En consecuencia, observamos que se podía derivar una relación aún más precisa entre la pérdida de agua y la masa del huevo si calculábamos la cantidad total de agua perdida durante el período de incubación y relacionábamos este valor con la masa inicial del huevo mediante una gráfica.

Nuestro examen cubrió los huevos de unas 65 especies de aves, con una masa que oscilaba entre 1,5 y 500 gramos y un período de incubación entre 11 y 70 días. Los resultados mostraron una remarcable tendencia constante: independientemente de la masa o del tiempo de incubación, un huevo típico perderá el 15 por ciento de su masa inicial durante la incubación natural. Esta pérdida da lugar al volumen de la cámara de aire, cuya importancia funcional para el embrión hemos discutido ya.

Los espacios gaseosos dentro del huevo están saturados esencialmente por vapor de agua, de modo que a la temperatura promedio de incubación para la mayoría de las especies (35,6 grados Celsius) la presión de vapor dentro del huevo es de 44 torr. Para que el huevo pierda la cantidad de agua requerida, la presión de vapor en el microclima de un nido de ave típico debe mantenerse a unos 15 torr, equivalente a una humedad relativa del 45 por ciento. El nivel de humedad sólo puede mantenerse ventilando periódicamente el nido con aire atmosférico más seco. Aunque no se sabe cómo el progenitor reconoce la humedad del nido, con su comportamiento es capaz de regular el paso de vapor de agua del nido al aire ambiente más seco. El progenitor, por tanto, tiene dos funciones principales durante la incubación: no sólo calienta los huevos a una temperatura óptima sino que también mantiene la humedad del aire del nido dentro de estrechos límites.

La duración del desarrollo embrionario, o tiempo de incubación, está determinado probablemente por factores genéticos, pero la tasa metabólica del embrión debe estar ajustada a este tiempo de incubación, de modo que al final del período –largo o corto– el embrión esté suficientemente maduro para eclosionar y sobrevivir. Se podría predecir por tanto la intrigante posibilidad de que la exacta geometría de los poros de la cáscara del huevo (y por ende la conductancia de la cáscara para el oxígeno) esté calibrada tanto para la masa del huevo como para su tiempo de incubación.

Parece claro que tanto la cáscara del huevo como sus membranas asociadas están estrechamente adaptadas a las necesidades respiratorias del embrión, aunque se han hecho ciertos compromisos en el transcurso de la evolución para asegurar la estabilidad mecánica del huevo y el equilibrio ácido-base y de los fluidos del embrión. Nuestros estudios han demostrado también que el huevo de las aves proporciona un modelo ideal para el estudio de la difusión de los gases, que puede finalmente ayudar en la comprensión de los procesos de difusión más complicados que tienen lugar en las vías aéreas y en los sacos aéreos del pulmón humano.

Estructuras atómicas de superficies cristalinas

Se investigan los procesos físicos más importantes en la difracción de electrones de baja energía (LEED) y se resumen los logros obtenidos en la determinación de las posiciones atómicas en superficies de sólidos

P. M. Echenique y M. A. Van Hove

En la materia suelen distinguirse tres aspectos o estados de agregación: sólido, líquido y gaseoso. Los cuerpos sólidos oponen una gran resistencia contra todo cambio de forma y de volumen, y los que experimentan, siempre pequeños, a menudo pueden despreciarse. Del sólido cristalino vamos a ocuparnos aquí. Un sólido se comunica con el medio exterior a través de sus primeras capas de átomos: su superficie. Dichas capas, a pesar de contener solamente una parte entre diez millones de la masa total de una muestra típica de material, juegan un papel crucial en muchos procesos físicos y químicos, algunos de ellos de gran importancia tecnológica, tales como oxidación, catálisis, crecimiento de cristales, procesos de fricción y tecnología de semiconductores.

Es necesario un entendimiento de los procesos citados desde un punto de vista microscópico. Por ejemplo, el fenómeno de la oxidación implica la penetración de átomos de oxígeno dentro del sólido a través de la superficie y, aunque pueda parecer sorprendente, se sabe muy poco en la actualidad sobre los detalles de este fenómeno. En catálisis, las reacciones químicas sufren profundas modificaciones, tanto en lo referente a la velocidad de las mismas como en lo referente a la selectividad de los reactivos, por la presencia d e pequeñas cantidades de partículas extrañas, llamadas catalizadores, las cuales no se alteran durante la reacción química. La comprensión de este fenómeno exige un conocimiento detallado de la interacción microscópica entre los átomos de las especies químicas reaccionantes y los átomos catalizadores; dicho conocimiento es prácticamente inexistente en la actualidad.

No es posible ningún tipo de avance en estos problemas, muy complicados, sin saber cuál es la posición relativa de los átomos en la superficie del material. En los últimos años, la difracción de electrones de baja energía (que se abrevia con el acrónimo LEED, del inglés "Low Energy Electron Diffraction") se ha mostrado como una de las técnicas más útiles en la determinación de estructuras superficiales. A pesar de que los aspectos técnicos del LEED son un tanto complejos, sus principios físicos más importantes pueden explicarse de forma sencilla. Este artículo se concentrará en la explicación de los principios físicos implicados en el proceso de difracción de electrones de baja energía, resaltando las diferencias y analogías con su análogo para el estudio del interior de los sólidos: la difracción de rayos X. Resumiremos también la situación actual de LEED, mencionando una selección entre los hallazgos específicos de este método. Por último, contemplaremos sus perspectivas de futuro.

La superficies representan un estado intermedio entre moléculas libres y el interior de los sólidos; y ostentan características comunes a ambos. Los átomos de la superficie limitan, por un lado, con el vacío, tal y como les ocurre a las moléculas en fase gaseosa; por otro, están ligados a muchos átomos, de manera análoga a como se hallan sus compañeros en el interior de un sólido.

¿Cómo se determina la estructura de las superficies? La estructura interna de moléculas y sólidos se determina hoy en día mediante el uso de técnicas bien conocidas, tales como difracción de rayos X o difracción de electrones de alta energía. Estas técnicas no pueden aplicarse al estudio de las superficies, porque tanto los rayos X como los electrones de alta energía penetran profundamente en el interior del material; y pierden toda sensibilidad a la región superficial. La difracción de electrones de baja energía, donde por baja entendemos energías en el rango 1-500 electronvolt, por razones que más adelante veremos, realiza una penetración muy pequeña dentro del sólido; por tanto, es muy sensible a las posiciones atómicas en superficies sólidas.

El método LEED no constituye ninguna técnica nueva. Precisamente acaba de celebrar su 51 aniversario. En 1927, un experimento de reflexión de electrones por superficies sólidas realizado por C.J. Davisson y L.H. Germer mostró, por primera vez, la naturaleza ondulatoria del electrón, confirmando la hipótesis formulada por De Broglie en 1924, lo que supuso un paso importante hacia el establecimiento de la teoría cuántica. En la misma época, G.P. Thomson y A. Read realizaron experimentos de transmisión de electrones a través de láminas metálicas delgadas, experimentos que ponían asimismo de manifiesto los efectos de difracción típicos de las ondas. Por estas observaciones G.P. Thomson y C.J. Davisson compartieron el premio Nobel de física en 1937. Los diversos intentos de Davisson y Germer por explicar los pormenores de sus experimentos mediante la simple y bien establecida teoría de difracción de rayos X no tuvieron éxito. Por un lado, en aquel entonces no se podía controlar aún suficientemente bien el estado de la superficie durante el experimento, estado que afectaba fuertemente al resultado del experimento. Por otro, se sabe hoy en día que la interacción de los electrones de baja energía con el sólido es mucho más fuerte que la interacción sólido-rayos X, invalidando por tanto las teorías de difracción de rayos X en este contexto.

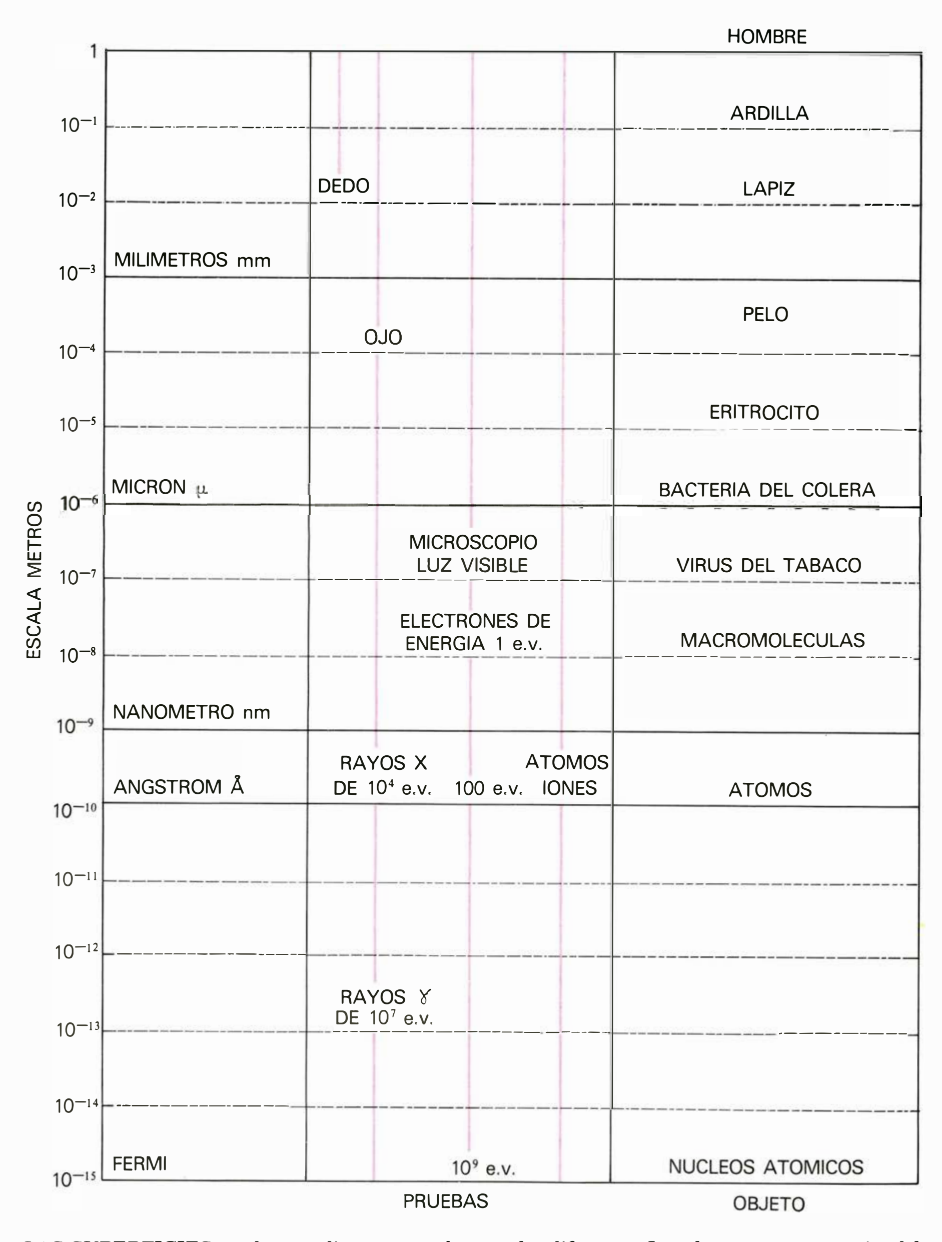
Estas razones, junto con la mayor facilidad de generar y controlar rayos elec-

trónicos de alta energía y la cuestión de la poca penetración de la muestra por parte de los electrones de baja energía, favorecieron el abandono del LEED y el desarrollo de la difracción de electrones de alta energía ("High Energy Electron Diffraction" HEED) en láminas metálicas delgadas y gases moleculares. Para resucitar el LEED hubo que desarrollar sistemas de alto vacío, así como esperar que se registrara un gran avance en las técnicas experimentales de preparación de superficies. Debemos destacar aquí que fue precisamente una de las dificultades iniciales (a saber: la gran sensitividad a la región superficial) la causa del renacimiento del LEED en los primeros años de la década de 1960. Por su parte, la comprensión teórica de los procesos físicos esenciales en la difracción de electrones en superficie no llegó hasta el reconocimiento de la importancia de la interacción fuerte entre las superficies sólidas y los electrones de baja energía y su inclusión en el formalismo, hacia 1969. A partir de entonces, nuestro conocimiento teórico del LEED se ha revelado suficiente como para convertir dicha técnica en un instrumento eficaz que ha permitido determinar, hasta la fecha, alrededor de unas cien estructuras superficiales de una gran variedad de materiales con y sin átomos y moléculas extraños, agregados a la superficie.

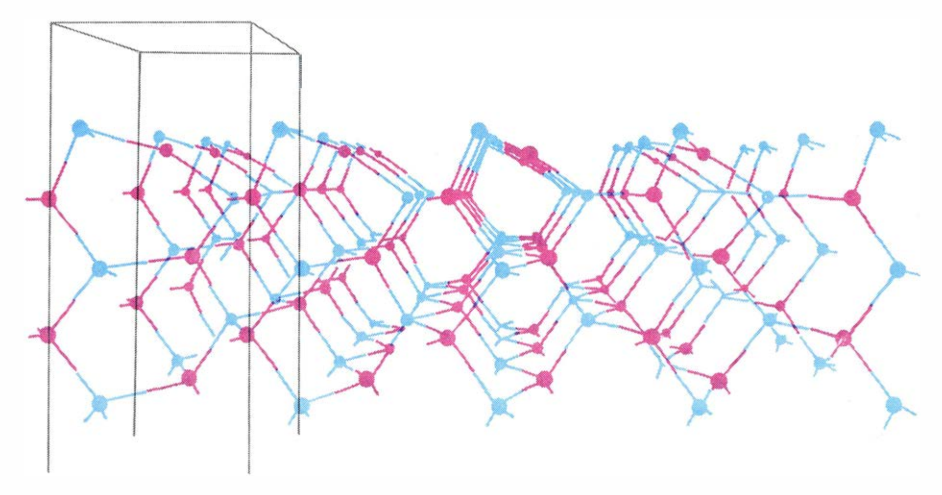
Una superficie puede estudiarse en muchas escalas diferentes. Por ejemplo, en el caso del dedo, la forma más obvia de la superficie es la que se da en la escala de un centímetro (la forma general de un lápiz es fácilmente detectada por el dedo, pero éste no puede distinguir detalles menores que un milímetro); esto se debe a que nuestro dedo tiene las mismas dimensiones que aquellos objetos o superficies a los que es sensible [*véase la ilustración de la derecha*]. Por tanto, si queremos estudiar una superficie a escala atómica, tal como la que aparece representada en la ilustración superior de la página siguiente, necesitaremos algo, que llamaremos prueba, que tenga dimensiones de 0,1 nanómetros (0,1 nanómetros equivalentes a 0.0000000001 metros = 1 angstrom). Tal como fue sugerido por Louis de Broglie en 1924, y confirmado experimentalmente por Davisson y Germer en 1927, toda partícula tiene asociada a ella una onda cuya longitud de onda depende inversamente del producto de su masa y velocidad (su momento) y, por tanto, de la raíz cuadrada de la energía asociada a su movimiento (energía cinética). Por ejemplo, un electrón con una energía de 100 electronvolt tiene una longitud de onda asociada de cerca de 0,1 nanómetros, es decir, comparable con el tamaño de los átomos. Esta dualidad onda-partícula significa que, en algunos experimentos, se observará el aspecto de partícula mientras que en otros aparecerá el carácter ondulatorio. Una regla orientativa es que el carácter ondulatorio de las partículas se observará cuando el objeto con el que la partícula interacciona tenga dimensiones o estructuras internas comparables con la longitud de onda asociada a dicha partícula. Bajo dichas condiciones, tales ondas son particularmente sensibles a la estructura geométrica del objeto. Esta característica es la que tanto el LEED como la difracción de rayos X explotan.

Un experimento típico de LEED consiste en un rayo de electrones con energía y dirección bien definidas, orientado hacia la superficie que nos interesa estudiar. Parte de los electrones incidentes son reflejados en la superficie, mientras que el resto es absorbido por el sólido.

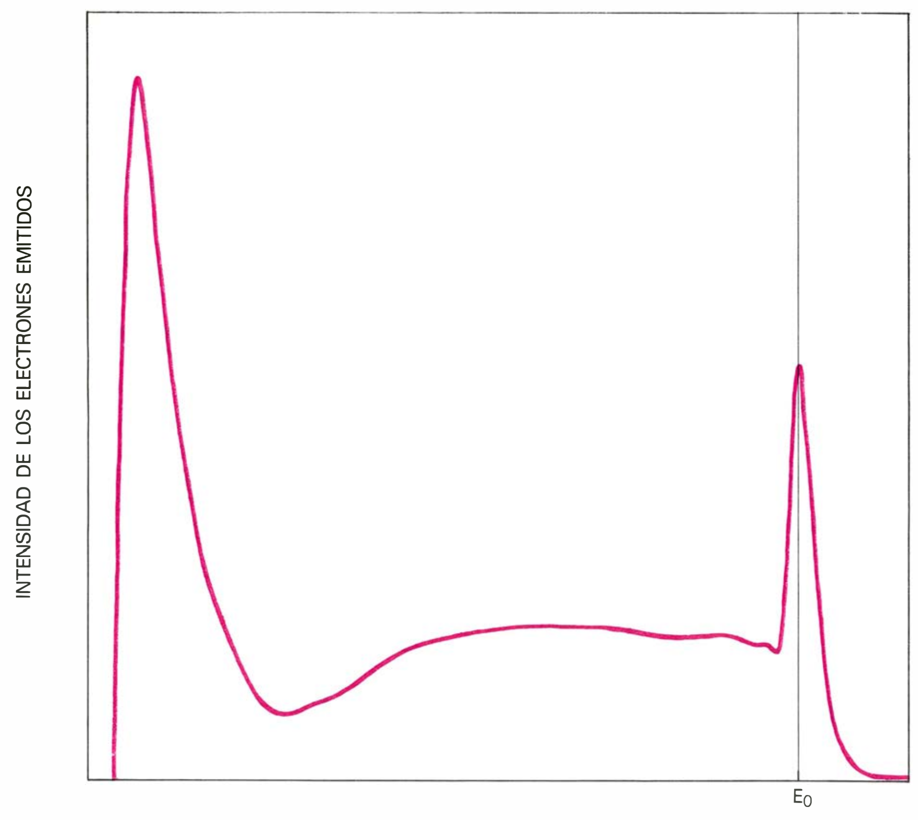
En este proceso, pueden emerger de la superficie electrones secundarios (con energía menor que los incidentes) [*véase la figura inferior de la página 30*] El proceso de difracción se basa de una manera característica en la interferencia de ondas; requiere, por tanto, una energía bien definida, ya que nuestra regla de medir ahora es la longitud de onda y tenemos que mantenerla fija si queremos comparar diferencias de camino. Esto se consigue filtrando los electrones que han perdido energía en el proceso



LAS SUPERFICIES pueden estudiarse en muchas escalas diferentes. Los electrones con energías del orden de 100 electronvolt resultan muy adecuados para desentrañar la distribución de los átomos en la superficie, puesto que tienen longitudes de onda del orden de un angstrom (1 angstrom equivale a 10^{-10} metros, que es la "dimensión" del átomo). Un electronvolt (1 e.v.) es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado mediante una diferencia de potencial de un volt (1 e.v. equivale a 1,6 x 10^{-19} jules).



DISTRIBUCION DE LOS ATOMOS, que puede representarse como un enrejado. Los átomos (bolas) se conectan a través de líneas, que simbolizan el enlace químico. Esta representación desprecia los detalles de la estructura electrónica. El método de difracción de electrones de baja energía (LEED) no es sensible a dichos detalles. En la figura aparece representada esquemáticamente una superficie de arseniuro de galio (GaAs) en su forma reconstruida, predicha mediante el análisis LEED. Los átomos de la superficie aparecen desplazados de las posiciones que se esperarían a partir del conocimiento de su estructura en el interior del sólido. Los átomos de galio aparecen en rojo, los de arsénico en azul. Las longitudes de enlace (distancias entre átomos conectados por líneas) miden unos 2,45 angstrom. A esta superficie en particular se le marca con tres números (110) para distinguirla de otras del mismo material. (Los enteros 1,1,0 definen la orientación de la superficie). En la práctica, la superficie no es nunca tan regular como aparece aquí. Siempre hay algún tipo de desorden en las posiciones atómicas, causado por impurezas y otros defectos; también se registran vibraciones térmicas (es decir, pequeños desplazamientos de los átomos con respecto a las posiciones de equilibrio). Sin embargo, la información estructural obtenida mediante LEED no es sensible a dichas desviaciones de las posiciones estables (por ello no se incluyen); sólo aparecerán las posiciones medias. La estructura del sólido puede generarse mediante desplazamientos sucesivos de la celda unidad (*gris*). La estructura de las superficies que no tienen dicha celda unidad capaz de generar toda la estructura no puede ser estudiadas mediante el método LEED.



ESPECTRO ENERGETICO de los electrones emergentes de una superficie, como consecuencia de la incidencia de un rayo de electrones con energía E_0. El espectro presenta un pico a la energía E_0. Este pico contiene los electrones que se miden en el método del LEED (difracción de electrones de baja energía). Los electrones con menor energía son eliminados, filtrados, en un experimento de LEED. Se trata de electrones incidentes que han perdido energía en su paso por el sólido (pequeñas oscilaciones por debajo de E_0) o bien electrones del medio que han sido emitidos (los llamados electrones secundarios cuyo máximo aparece a bajas energías). El espectro de la figura es de la cara (110) del oro con una E_0 de 250 electronvolt. (La ilustración se publica por cortesía del doctor D. Wolf, de la Universidad de Munich.)

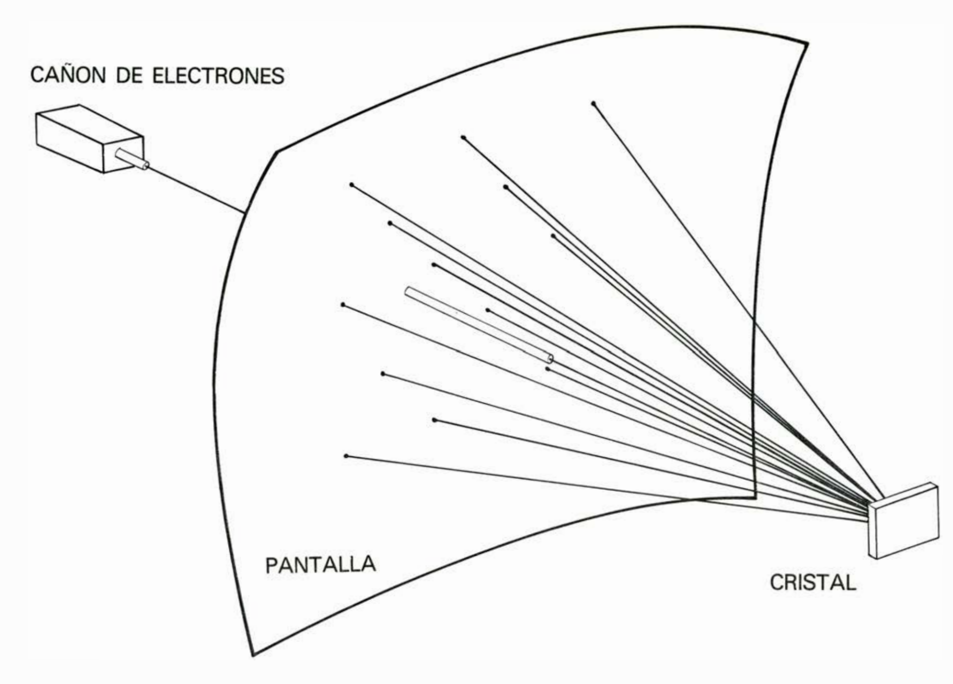
de colisión y observando sólo aquellos que emergen con la misma energía incidente. En la ilustración superior de la página 31 se muestra esquemáticamente un típico montaje experimental, en el que los electrones que han emergido sin haber perdido energía golpean una pantalla fluorescente, produciendo una imagen visual del resultado de la difracción en la superficie cristalina. En la ilustración inferior de la misma página aparece una fotografía de la figura de difracción en dicha pantalla. El rasgo más sorprendente de dicha figura de difracción es la aparición de un conjunto de puntos luminosos bien ordenados sobre un fondo prácticamente sin estructura. Estos puntos agudamente definidos aparecen sólo si la superficie tiene una distribución cristalina bien ordenada de átomos. Por tanto, los experimentos de LEED se hacen en monocristales (es decir, sólidos que están perfectamente estructurados a lo largo de todo su volumen).

Para entender el origen de estos puntos brillantes necesitamos tener en cuenta la naturaleza ondulatoria de los electrones. En el espacio libre, los electrones se pueden representar convenientemente mediante ondas planas (a saber, ondas que tienen planos como frentes de onda, similares a las ondas que golpean contra una playa lisa) o por ondas esféricas (o sea, ondas que tienen esferas como frentes de onda, comparables a las ondas que emergen de una perturbación localizada en la superficie del agua). La forma más conveniente de representar un rayo de electrones es mediante una onda plana, cuya longitud de onda viene determinada por la energía del electrón. Esta onda "chocará" con cada átomo del sólido y originará una serie de ondas esféricas que emanan de cada átomo del sólido. Tales ondas sólo se superpondrán constructivamente en direcciones bien definidas. Este fenómeno puede ser entendido por analogía con las ondas en la superficie de un líquido, como el agua. Los máximos de las diferentes ondas pueden coincidir, produciendo una gran amplitud de movimiento de la onda; si no coinciden, la amplitud es pequeña. La figura superior de la página 32 muestra cuál es la situación con una red regular de átomos. Amplitudes grandes de movimiento ondulatorio ocurren solamente en aquellas direcciones en las cuales las ondas esféricas tienden a construir frentes de onda planos, ya que sólo entonces coinciden los frentes de onda esféricos. Los científicos usan el concepto de red recíproca para predecir y designar dichas direcciones preferidas de difracción. La red recíproca corresponde

directamente a la red de puntos brillantes de la pantalla y puede ser relacionada de manera única con la disposición regular de átomos en la superficie [*véase la ilustración inferior de esta página*]. De hecho, la serie de puntos brillantes de la pantalla fluorescente sólo nos da información sobre el tamaño de la llamada celda unidad de la superficie. La celda unidad es la unidad estructural más pequeña que es capaz de reproducir la estructura total del sólido cristalino mediante desplazamientos repetidos a lo largo de la superficie. La disposición de los puntos brillantes no dice nada sobre el contenido [*véase la ilustración superior de la página 30*] de dicha celda unidad, es decir, sobre la posición relativa de los átomos dentro de la celda unidad.

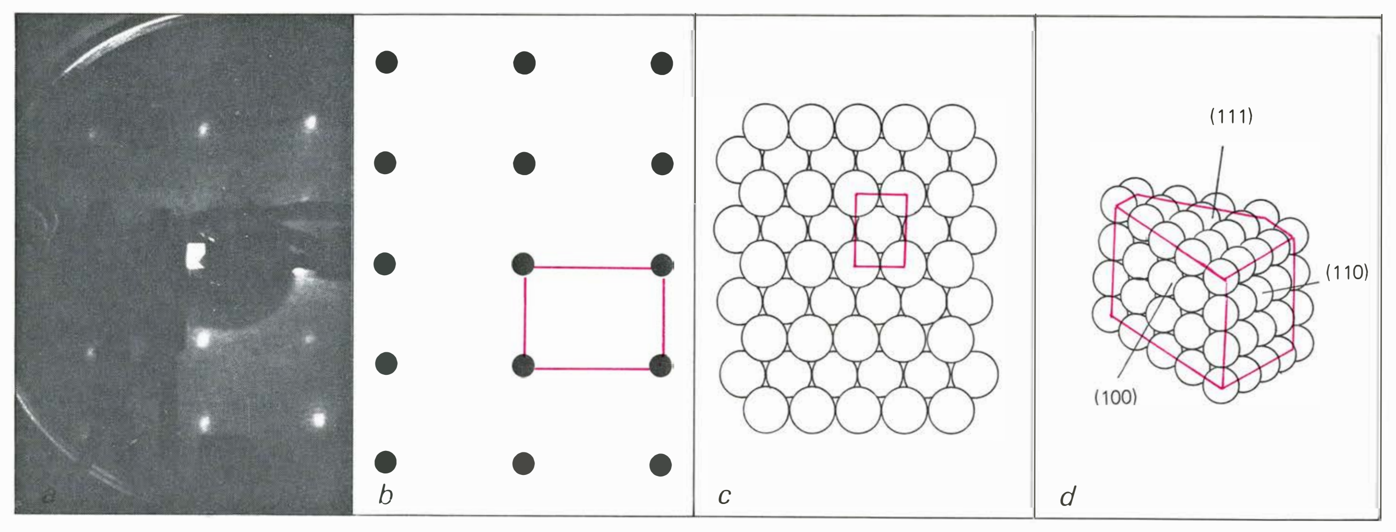
La posición relativa de los átomos en la celda unidad afecta sólo a la intensidad de los puntos luminosos, pero no a sus posiciones. Hay que medir, pues, la intensidad de dichos puntos para extraer toda la información sobre la estructura superficial. En particular, la dependencia de dichas curvas respecto de la energía es muy sensible a la estructura superficial. Esto es una consecuencia de la naturaleza ondulatoria del electrón. Las ondas originadas en átomos diferentes se superponen constructiva o destructivamente al variar su energía.

Las intensidades de los puntos luminosos se representan comúnmente en la forma de intensidad con respecto a la energía. Se adelanta un ejemplo de los mismos en la ilustración inferior de la página 32. Es necesario entender la trayectoria peculiar que siguen dichas curvas de intensidad en función de la energía del electrón, si queremos extraer la información que contienen respecto a las posiciones atómicas. Para ello, se exige como prerrequisito el conocimiento de las propiedades de la interacción entre electrones y sólidos.

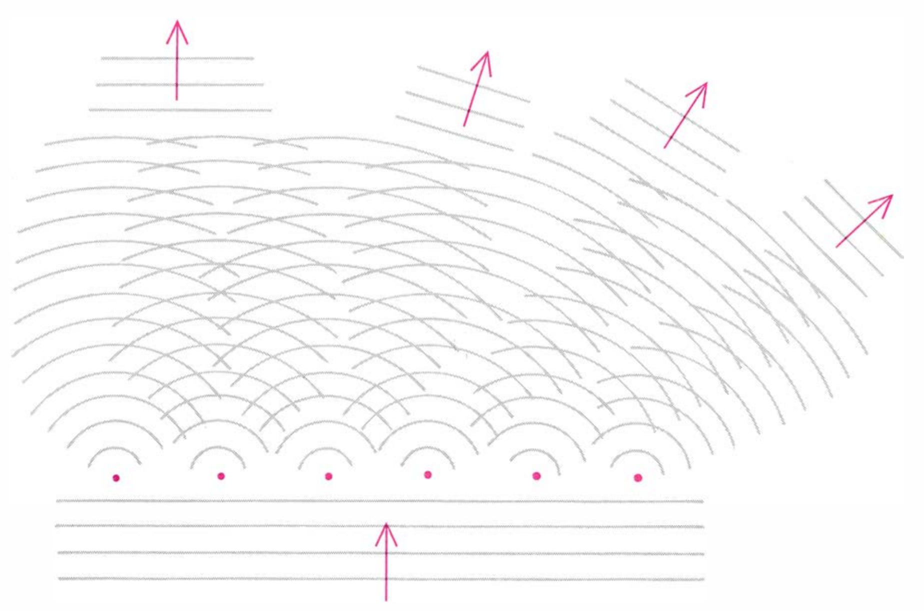


EXPERIMENTO LEED. En su aplicación, dicho método usa un cañón de electrones dirigido, a través de un agujero en la pantalla fluorescente de observación, hacia una muestra monocristalina que refleja los electrones a lo largo de ciertas direcciones privilegiadas formando rayos que golpean la pantalla. En la práctica, un filtro electrostático (que no aparece en la figura) se inserta justo antes de la pantalla, con el objeto de remover los electrones dotados con una energía menor que los del haz incidente.

Examinaremos ahora de forma más detallada la física del proceso de difracción, a fin de entender la conexión entre las curvas intensidad-energía y la geometría de la superficie. Los electrones experimentan dos tipos de interacciones con el sólido. Primeramente, son desviados en colisiones con los átomos del sólidos. Este es un proceso muy probable, pudiendo ocurrir varias veces consecutivas. Por tanto, la mayoría de los electrones han experimentado muchas colisiones antes de que hayan sido detectados en la pantalla fluorescente. Este hecho está en notable contraste con lo que sucede con los rayos X, donde



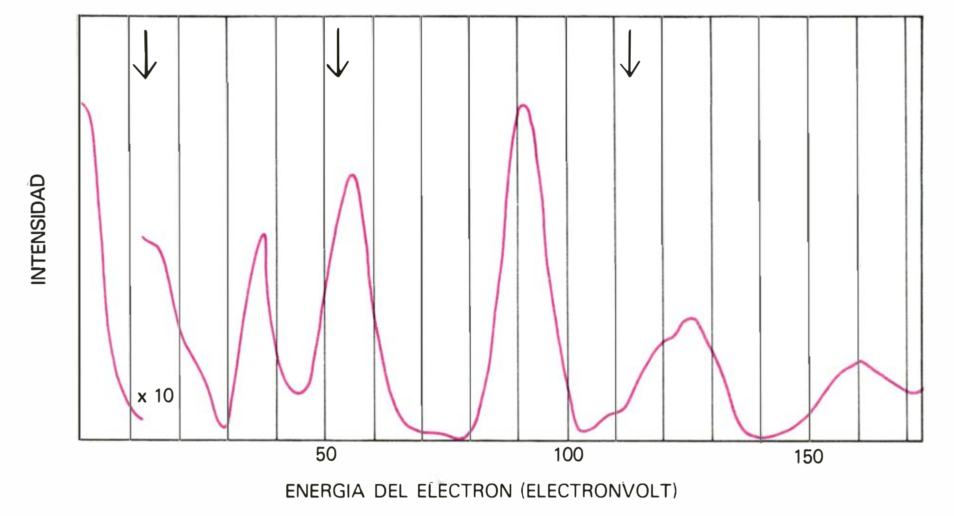
RED RECIPROCA es el concepto que usan los físicos para predecir y designar las direcciones de difracción privilegiadas. La red recíproca corresponde a la red de puntos brillantes de la pantalla. La fotografía (que publicamos por cortesía de los doctores M. Alff y W. Moritz, de Munich) de una pantalla de LEED (parcialmente obscurecida por el cristal, el soporte del cristal y otros aparatos) muestra la figura de difracción de la superficie (110) de la plata. Los puntos luminosos pueden relacionarse directamente con los puntos de la llamada red recíproca (*b*) de la estructura superficial. Una muestra bidimensional de dicha estructura aparece en (*c*) (para el caso de átomos de materiales metálicos se acostumbra el dibujar esferas grandes tangentes, en vez de esferas unidas por líneas, puesto que entonces el enlace entre átomos no tiene direcciones claramente privilegiadas). Las longitudes de los lados de las celdas unidad rectangulares (*rojo*) en (*b*) y (*c*) son inversamente proporcionales. En (*d*) se aprecia una vista tridimensional de un cristal con la estructura de la plata [la llamada cúbica centrada en las caras (f.c.c.)] mostrando explícitamente tres caras. Estas se designan (110), (100) y (111). Estos índices especifican la dirección de varios de los planos superficiales con respecto a algunas direcciones cristalográficas estándar.



ONDAS ESFERICAS, que emanan de una red regular de átomos. Estas ondas se superponen hasta formar ondas planas por fusión de frentes de onda esféricos. Esto ocurre sólo en ciertas direcciones bien definidas, produciendo una serie de rayos de electrones difractados. (La red se halla en la base.)

prácticamente sólo ocurre una colisión entre los rayos X y el sólido. El proceso de colisión electrón-átomo se realiza sin pérdida apreciable de energía. Los físicos la denominan colisión elástica. La segunda interacción importante entre los electrones y el sólido sí implica una pérdida apreciable de energía (colisión inelástica). Los electrones, al moverse a través del material, pueden ceder parte de su energía al medio; en consecuencia, el número de electrones que no han perdido energía decrece con la distancia recorrida por los electrones. La distancia media recorrida por un electrón antes de perder energía recibe el nombre de recorrido libre medio. Puesto que nosotros limitamos nuestra atención a aquellos electrones que no han perdido energía, se deduce que los electrones observados no pueden haber penetrado en el sólido más que alrededor de un recorrido libre medio. Esto nos define la superficie que el LEED "ve". El recorrido libre medio de un electrón en un sólido depende de la energía del electrón [*véase la ilustración de la página siguiente*]. En esa misma ilustración puede observarse que, para electrones de energías del orden 70-400 electronvolt, el recorrido libre medio es de 5 - 10 angstrom: más o menos el equivalente de cinco capas atómicas, esto es nuestra superficie. Para otras energías, el recorrido libre medio puede ser apreciablemente mayor; ello reduce la sensibilidad de los electrones difractados a la estructura de la superficie. (Utilizando ángulos de incidencia muy pequeños se puede conseguir que electrones con largo recorrido medio sean sensibles a la estructura superficial. Sin embargo, ángulos de incidencia tan pequeños introducen una sensibilidad no deseada a imperfecciones de largo alcance, que están siempre presentes en la superficie.) En la difracción de rayos X, el recorrido libre medio es varios órdenes de magnitud mayor que en el LEED; queda entonces desechada toda sensibilidad a la superficie.

Si conocemos cuáles son las interacciones importantes en el LEED podremos analizar con mayor detenimiento el proceso de difracción. Nuestro objetivo es entender la conexión entre las curvas intensidad-energía y la superficie geométrica. Representemos nuestro sólido mediante un modelo unidimensional tal y como aparece en la ilustración de la página 34 (*a*). En este modelo cada átomo representa de hecho un plano de átomos paralelo a la superficie en la estructura tridimensional. Nos limitaremos a un espacio unidimensional: la onda no puede abandonar la línea que contiene los átomos. La onda puede ser representada mediante un número complejo: el cuadrado del valor absoluto de dicho número complejo es proporcional al número de partículas en el rayo, es decir, al flujo de partículas.



INTENSIDAD de un punto luminoso dado en la pantalla de LEED. Esta intensidad depende fuertemente de la energía del electrón. Esta dependencia aparece representada en la figura en una curva llamada de intensidad-energía (curva I-E). Dicha curva ha sido determinada experimentalmente para un cierto punto luminoso originado en la difracción de electrones por la superficie (100) del níquel [que se ilustra como la cara (100) de la figura inferior de la página anterior]. Las flechas denotan las energías para las que se satisface la condición de Bragg, y donde aparecerían los únicos picos permitidos por la simple teoría cinemática de la difracción. Dichos picos aparecen aquí (junto con otros que tienen su origen en colisiones múltiples) desplazados en energía (para compensar el cambio en longitud de onda que experimenta el electrón al penetrar en el cristal). El recorrido libre medio finito de los electrones ensancha los picos. La posición relativa de los átomos en la celdad unidad afecta a la intensidad de los puntos, no a sus posiciones. (Cortesía de los doctores S. Andersson y B. Kasemo, Univ. de Göteborg.)

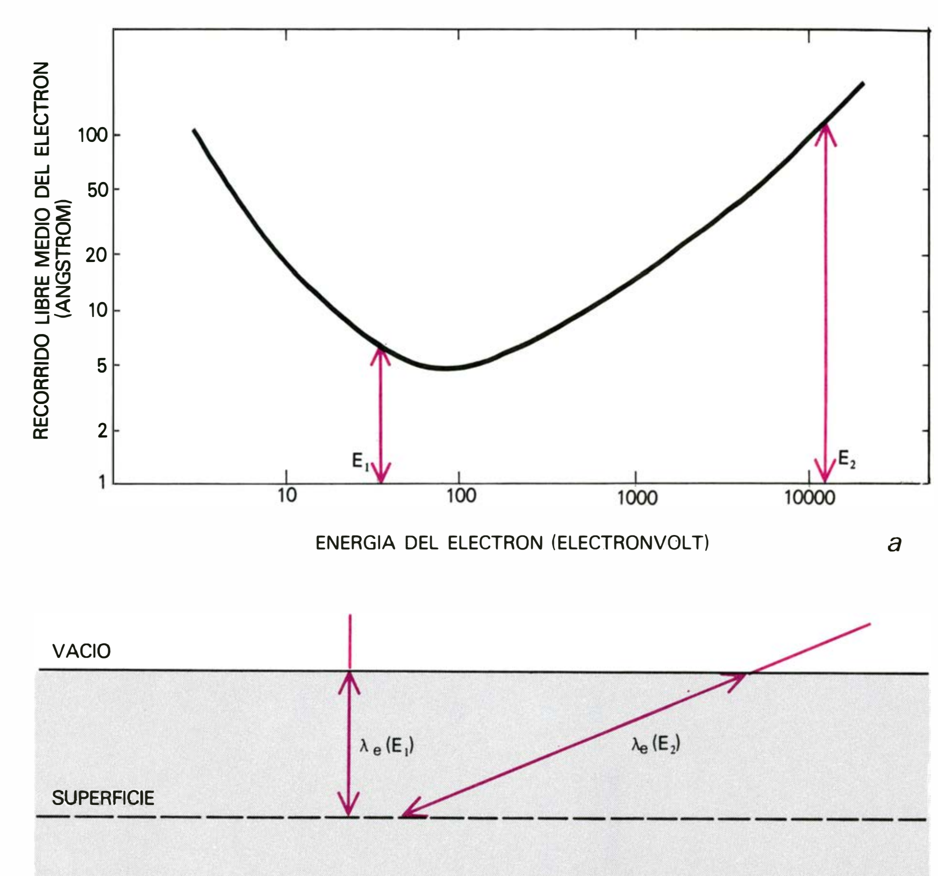
Supongamos que una onda plana incide en nuestro cristal unidimensional. Muchas veces solo se representa la parte real de dicha onda, la cual tiene la forma familiar de una sinusoide. La onda incidente penetra en el cristal unidimensional y se refleja en cada átomo. Las ondas reflejadas por cada átomo estarán o no estarán en fase, es decir, los máximos de sus partes reales coincidirán (*b*) o no coincidirán (*c*); si coinciden, ocurrirá una fuerte reflexión; si no coinciden, la reflexión será muy débil debido a mutuas cancelaciones. Tal y como puede verse en la figura *b* de dicha ilustración, las onda reflejadas están en fase cuando la longitud de onda es tal que encaja un número entero de veces en la diferencia de camino entre reflexiones de átomos sucesivos (es decir, cuando el doble del espaciamiento interatómico es igual a un número entero de longitudes de onda). Esta es la ley de Bragg, bien conocida en difracción de rayos X. Esta

ley supone, para su validez, que la reflexión por cada átomo es pequeña. Puesto que la longitud de onda depende de la energía del electrón, las curvas de la intensidad reflejada en función de la energía mostrarán picos sólo para ciertas energías, llamados picos de Bragg (*d*).

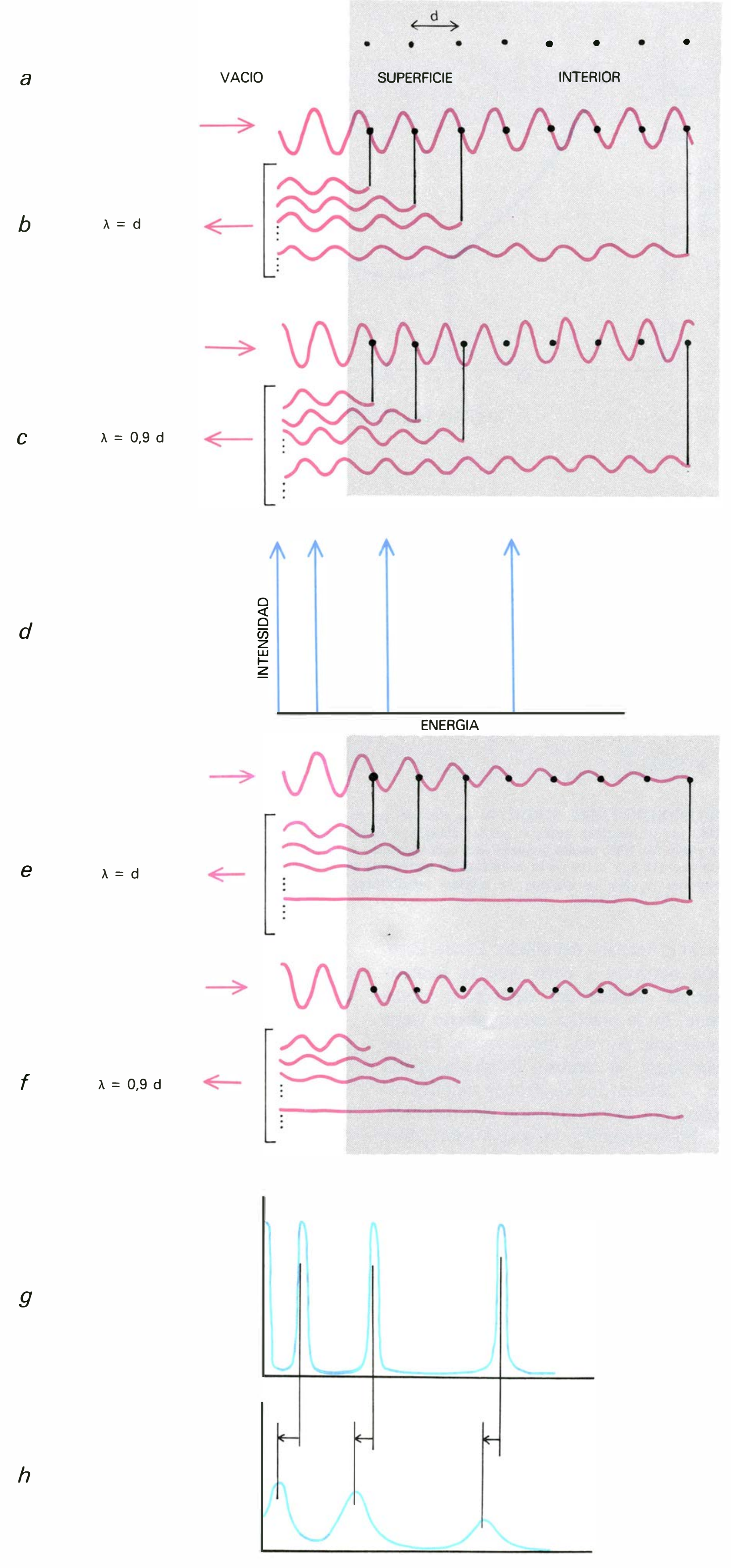
Esta descripción teórica ha sido muy útil en difracción de rayos X. Tiene sin embargo un punto débil: no se conserva el flujo total. En cada reflexión, una parte no nula del flujo se refleja; pero al mismo tiempo el flujo incidente que penetra en el interior del cristal no se reduce, como debiera hacerlo. Esta falta de coherencia del modelo se muestra como picos de Bragg infinitamente altos, puesto que un número infinitos de átomos refleja una cantidad finita de flujo. La incoherencia de nuestra descripción puede salvarse si asignamos a cada átomo un factor de transmisión (entendiendo por tal la fracción del número transmitido al número de partículas incidente) un poco más pequeño que la unidad. A través de este procedimiento se consigue que la incidencia en la onda reflejada por parte de los átomos situados muy lejos de la superficie sea despreciable, obteniéndose, por tanto, una reflexión finita (*e* y *g*). Estrictamente hablando, el reducir la transmisión no satisface el requerimiento de conservación de flujo. Ello es así porque una onda reflejada puede volver a ser reflejada en su camino hacia el exterior del sólido, proceso que puede iterarse muchas veces. Dichas colisiones múltiples no afectan de un modo significativo a nuestros resultados anteriores, por lo menos en una dimensión: todavía tenemos fuertes picos de reflexión a las energías que satisfacen la condición de Bragg. En este punto podemos establecer una conexión interesante con la llamada teoría de bandas de los sólidos.

Hoy en día se sabe que los electrones tienen ciertas regiones de energía prohibida en su movimiento dentro de sólidos dotados con una ordenación regular de átomos. Tales zonas de energía prohibida están separadas por bandas de energía permitida. Las zonas de energía prohibida se corresponden exactamente con las regiones de máxima reflectividad. A dichas energías, los electrones no pueden penetrar en el cristal; se reflejan, pues, totalmente. Las zonas de energía prohibida y la fuerte reflexión superficial tienen la misma causa física: la difracción. El siguiente paso en nuestra comprensión del proceso de difracción consiste en cuestionar la suposición, implícita en nuestro razonamiento anterior, de que la longitud de onda del electrón no cambia cuando éste penetra del vacío al interior del sólido. Dicha asunción equivale a decir que la llamada energía cinética del electrón es constante. En la práctica este supuesto viene invalidado por dos mecanismos. En primer lugar, el electrón incidente aparta de su camino los electrones móviles del sólido por mera repulsión electrostática. Como resultado, la superficie, antes eléctricamente neutra, aparece como si tuviese un carga efectiva positiva en las regiones próximas a los electrones incidentes, produciendo una atracción y, por tanto, una aceleración de los electrones incidentes; es decir, la energía cinética crece, y la longitud de onda decrece, cuando los electrones entran en el sólido [*véase la ilustración superior de la página 35*]. En segundo lugar, los electrones, después de haber penetrado dentro del sólido, son atraídos por los núcleos atómicos. En virtud de esta atracción, cambian de dirección, y además se aceleran o deceleran al aproximarse o abandonar un núcleo atómico, respectivamente. La velocidad, y por tanto la energía cinética del electrón, es máxima cerca del núcleo y mínima en las regiones entre núcleos.

La condición de Bragg para reflectividad máxima se apoya en la medida de diferencias de camino entre ondas reflejadas en unidades de la longitud de onda. El primer mecanismo, arriba citado, reduce la longitud de onda; hay que reducir, pues, la energía cinética (aumentar la longitud de onda) para satisfacer la ley de Bragg, por lo que los picos de Bragg ocurrirán a energías más bajas. El segundo mecanismo también cambia la diferencia de caminos en unidades de la longitud de onda y, por tanto, desplaza las energías a las que aparecen los picos de Bragg. Este desplazamiento en las energías de los picos de Bragg depende fuertemente de la energía y, consecuentemente, varía de pico a pico tanto en magnitud como en dirección. Durante toda la exposición precedente, hemos supuesto que la geometría de la superficie se ha mantenido fija. Si el átomo más externo cambiara su posi-



RECORRIDO LIBRE MEDIO de un electrón en un medio material. Define la distancia media recorrida por un electrón antes de perder energía, y depende de la energía del electrón. Los electrones con un recorrido libre medio pequeño son más sensibles a la región superficial, para el caso de un electrón con energía E_1 y cerca de la condición de incidencia perpendicular. Para energías con recorridos libres mayores λ_e sólo se obtiene la misma sensibilidad usando ángulos de incidencia casi paralela.



ción, los diferentes caminos de reflexión modificarían sus longitudes relativas y se alterarían las adiciones o cancelaciones de las contribuciones de los diferentes átomos a la onda reflejada. Ello comportaría que las curvas intensidad-energía cambiaran notablemente, puesto que la última capa contribuye de forma sustancial a la reflectividad total, debido al pequeño recorrido libre medio de los electrones. Lo cual explica la gran sensibilidad del LEED a la estructura atómica superficial.

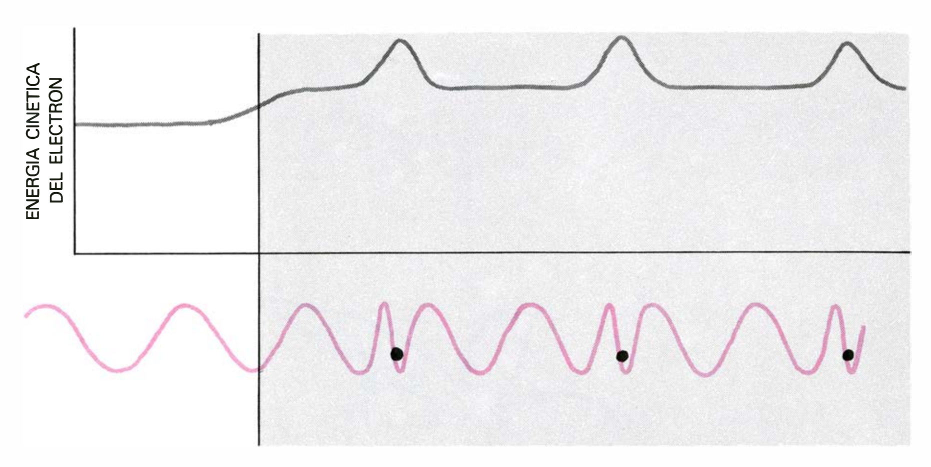
Hasta el momento nos hemos mantenido en las posiciones de los picos de la curvas de intensidad-energía. Ahora nos concentraremos en las anchuras de dichos picos. Tales anchuras están relacionadas íntimamente con el decrecimiento gradual en amplitud experimentado por esas ondas conforme penetran en el sólido. Según se ha mencionado antes, dicho decrecimiento está causado, por un lado, por la pérdida de flujo debida a sucesivas reflexiones y, por otro, por la disminución en el número de electrones que mantienen su energía inicial. En la práctica, el segundo efecto suele ser mucho más fuerte que el primero. Para comprender la conexión entre las anchuras de los picos y el decrecimiento en amplitud de la onda, fijémonos en la ilustración de esta misma página. Cuando la longitud de onda no satisface exactamente la condición de Bragg, las reflexiones provenientes de átomos profundos están fuera

LA INTERFERENCIA de ondas determina la intensidad de los puntos luminosos de difracción. Este efecto aparece ilustrado en una dimensión en la figura (*a*). En los diagramas se supone una serie de átomos equidistantes extendiéndose desde la superficie hasta el interior del sólido (*a*). Imaginemos que una onda incida sobre la superficie y sólo pueda ser reflejada una vez por un átomo dado. Si todos los átomos reflejaran la onda de la misma manera, y si la longitud de onda valiera la distancia interatómica, todas las ondas reflejadas estarían en fase (*b*), produciendo una fuerte reflexión total. Esto ocurrirá para ciertas longitudes de onda; en concreto, siempre que un número entero de veces la longitud de onda fuera igual al doble de la distancia interatómica (condición de Bragg). Para cualquier otra longitud de onda, las ondas reflejadas no estarán en fase y tenderán a cancelarse mutuamente (*c*). Como resultado, si dibujamos la intensidad reflejada en función de la energía (curvas I-E), sólo aparecerán máximos para aquellas energías cuyas longitudes de onda satisfagan la condición de Bragg (*d*). La introducción de un coeficiente atómico de transmisión debilitará las reflexiones provinientes de átomos en las profundidades del material (*e*) y hará que la cancelación de las ondas reflejadas resulte menos efectiva para longitudes de onda que se separen ligeramente de la condición de Bragg (*f*). Las curvas I-E tendrán ahora máximos con anchura finita. Cambios en la longitud de onda del electrón, inducidos por la interacción de este con el material, desplazan los picos de sus posiciones anteriores y, al propio tiempo, dichos picos se ensanchan adicionalmente debido a la reducción del flujo que viene causada por los procesos de pérdida de energía.

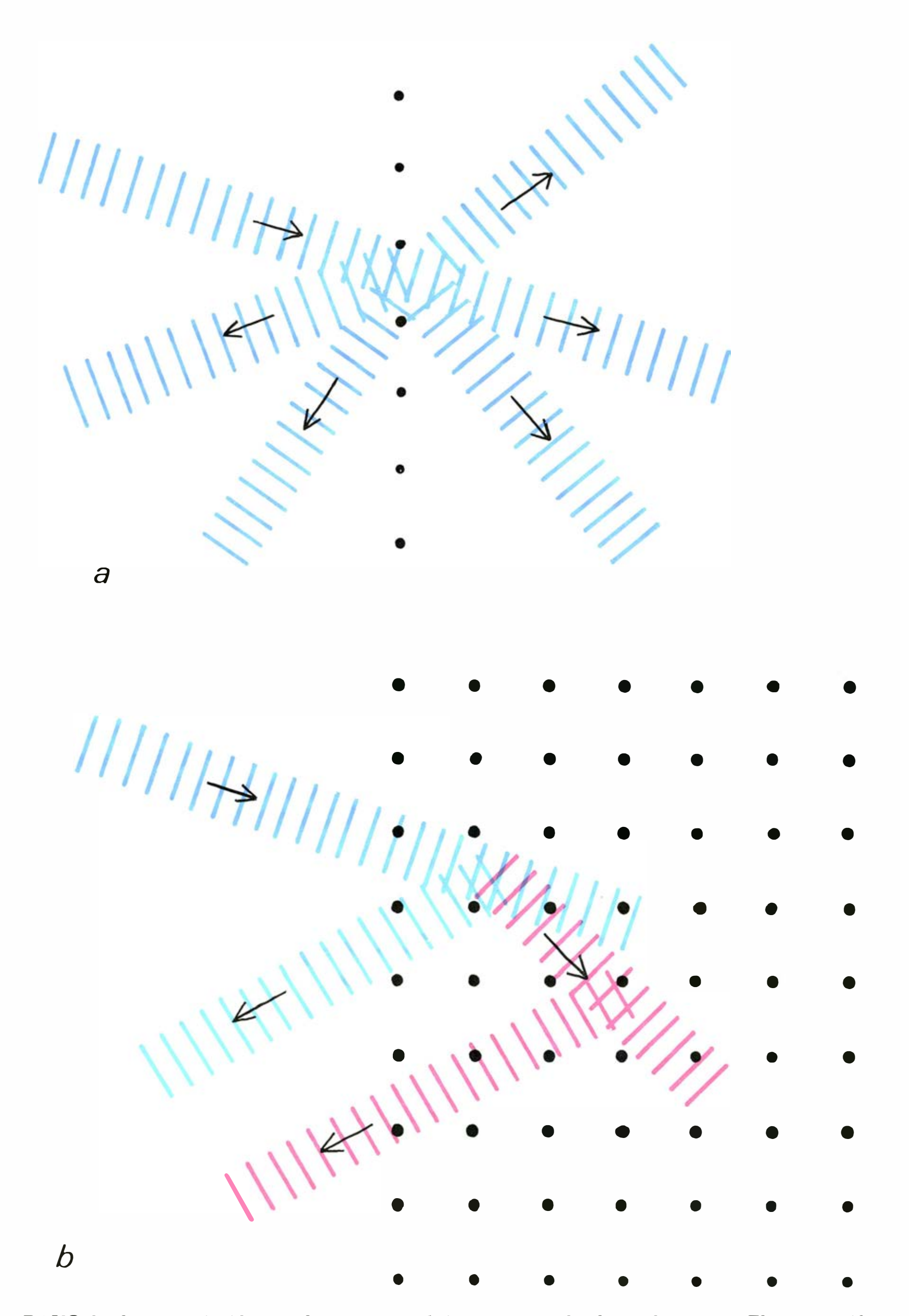
de fase con la reflexión de la capa atómica más externa; por tanto, reducen de un modo drástico la reflexión total. Si ahora introducimos el decrecimiento de la onda, las contribuciones de las capas profundas del material son prácticamente despreciables; la reflexión total será entonces mayor porque la cancelación será menor. Cuanto más decaiga la onda al penetrar dentro de las capas profundas del material, menor será la cancelación, y, por consiguiente, mayor la reflexión total; es decir, más anchos serán los picos de Bragg [*véase la figura de la página opuesta*]. Otra forma de describir este fenómeno es la siguiente: cuando la atenuación es fuerte, sólo una gran variación de la longitud de onda producirá efectos apreciables, y no aparecerá estructura fina, o detalles finos, en las curvas de intensidad-energía.

En la práctica no aparecen detalles más finos que unos pocos electronvolt. Este comportamiento es típico de todas las clases de ondas. Por ejemplo, es el causante de la anchura finita de los anillos de Newton que se observan cuando se refleja luz blanca por muestras planas de aceite de espesor variable. Es también responsable del límite en el poder de resolución de los radiotelescopios, que viene fijado por el tamaño finito de sus antenas parabólicas.

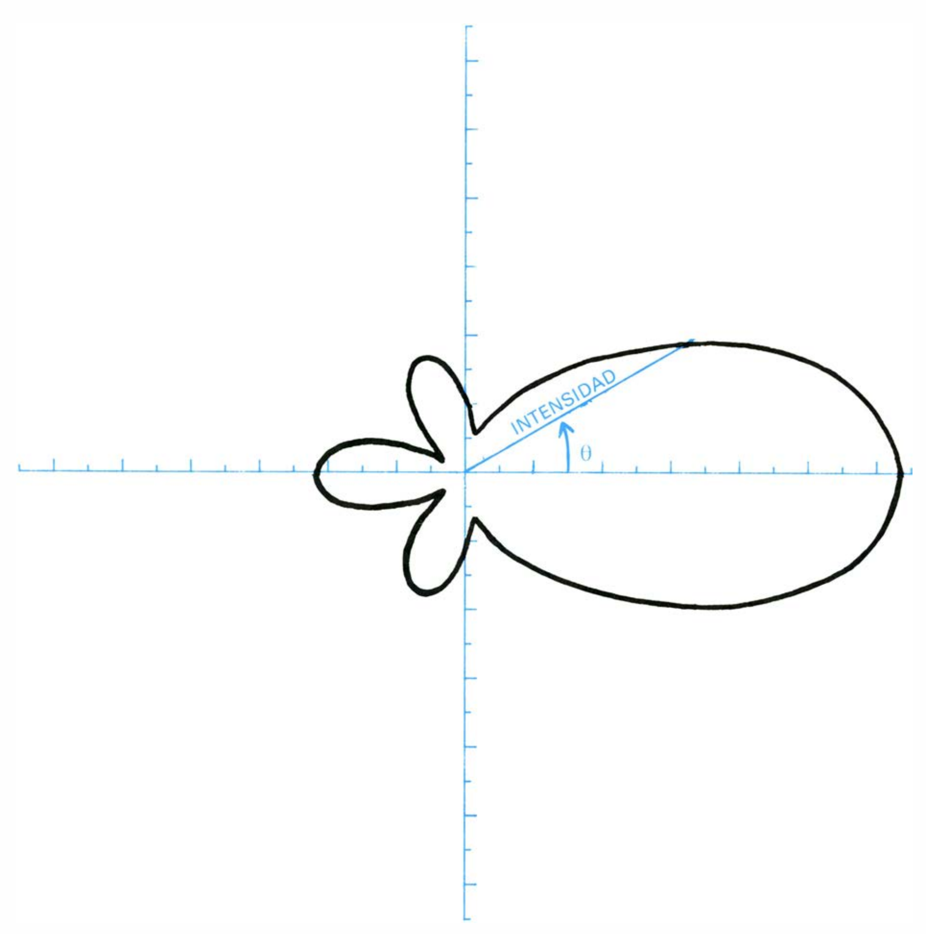
Además de los efectos mencionados hasta ahora, válidos en cualquier número de dimensiones, hay efectos que solamente ocurren en más de una dimensión. Hemos visto que la distribución regular de átomos a lo largo de la superficie origina una serie de puntos luminosos en la pantalla luminosa; de otra manera: la difracción genera una serie de rayos luminosos bien definidos. Dichos rayos conservan su existencia entre las capas sucesivas de átomos. Cuando el rayo incidente colisiona con la primera capa atómica, se refleja y se transmite en una familia de rayos con dirección bien definida [*véase la ilustración inferior de la derecha*]. Los rayos reflejados son observados en la pantalla; los transmitidos viajan hasta la siguiente capa atómica y allí son reflejados y transmitidos otra vez en las mismas direcciones. De esta manera, una ducha de rayos penetra hacia el interior del sólido, mientras que otra emerge hacia el exterior. En cada plano atómico, los electrones pueden cambiar, a través de colisiones, de un rayo a otro; caben pues muchos caminos de difracción. Si un camino de difracción es tan sencillo que sólo incluye una colisión con un plano atómico (colisión simple), obtenemos los picos de Bragg analizados anterior-



LA VELOCIDAD, y por tanto la energía cinética, de un electrón crece cuando éste penetra dentro del sólido y cuando pasa cerca de los núcleos atómicos. Por consiguiente, la longitud de onda se reduce tal como viene representado esquemáticamente. La onda incide desde la izquierda; una línea recta marca la separación entre el vacío y el sólido. Los núcleos atómicos se representan con puntos gruesos.



RAYO de electrones incidente sobre una superficie compuesta de planos de átomos. El rayo se difracta en una familia de rayos; éstos son difractados, a su vez, y así sucesivamente (*a*). Los electrones que emergen en una dirección pueden haber seguido vías diferentes de difracción dentro del material (*b*).



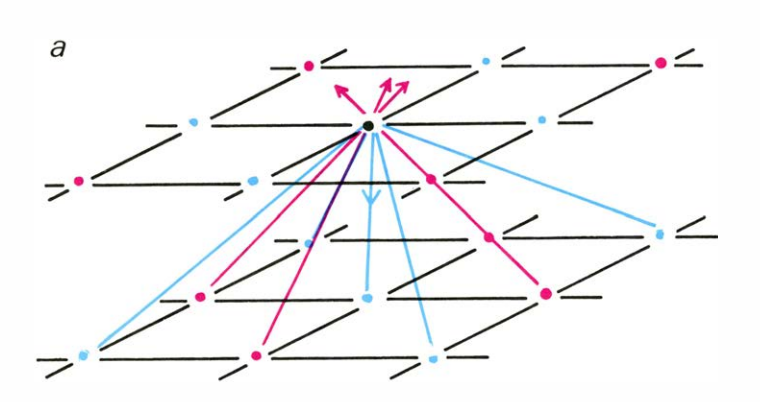
CUANDO UNA ONDA PLANA COLISIONA con un átomo se desvía en todas direcciones con diferente intensidad; en la ilustración se indica para el caso de electrones incidentes sobre un átomo de platino. El átomo actúa como una lente electrostática que desvía los electrones. Un diagrama de este tipo se conoce con el nombre de diagrama polar. La intensidad se dibuja a lo largo del radio dirigido hacia afuera del átomo en cada dirección. (Cortesía de D. Titterington, de la Universidad de Cambridge.)

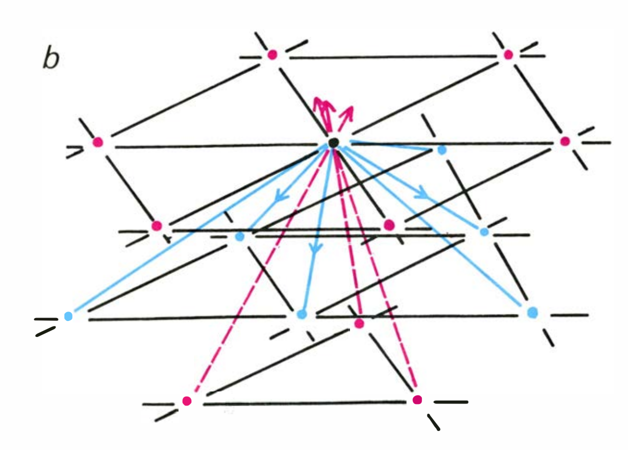
mente. Si ocurren dos o más colisiones (colisión múltiple) antes de la emergencia del electrón, se pueden generar nuevos picos. La condición de Bragg se debe generalizar para incluir todas las colisiones múltiples y, puesto que son posibles muchos caminos de difracción, hay muchas posibilidades de máximo en la figura de difracción.

Otro posible efecto tridimensional se halla relacionado con la física de la colisión entre un electrón y un átomo. El átomo actúa como una lente electrostática que desvía a los electrones. Debido a la naturaleza ondulatoria de los electrones, dicha desviación ocurre preferentemente a lo largo de ciertas direcciones, de forma análoga a lo que ocurre con ciertos transmisores de radio, que pueden ser construidos con direcciones de emisión privilegiadas [*véase la ilustración superior*]. Este efecto incide en las curvas intensidad-energía y ha de calcularse cuidadosamente en la práctica.

En el análisis precedente hemos introducido todos los ingredientes más importantes para una descripción adecuada del LEED. Cuando dichos ingredientes se tienen en cuenta simultáneamente, resulta una teoría compleja que requiere grandes cálculos numéricos, debido especialmente a las colisiones múltiples. Sería muy útil para sacar la información estructural contenida en las curvas experimentales de intensidad-energía, el disponer de una teoría que pudiese de alguna manera extraer esa información directamente de los datos experimentales. Esto, por desgracia, sólo es posible si la teoría se simplifica mediante algunas aproximaciones (como, por ejemplo, despreciar las colisiones múltiples), pero el precio que se paga por dichas simplificaciones es una reducción en la fiabilidad de los resultados obtenidos. Muchas veces se necesita gran exactitud y fiabilidad, lo cual sólo puede obtenerse mediante cálculos exactos. No se conoce por el momento ningún método alternativo al proceso de buscar entre las posibles estructuras con la esperanza de poder eliminar todas menos una, mediante la comparación de los cálculos teóricos con las curvas experimentales. Por esta razón, es de gran utilidad poseer información adicional sobre la superficie obtenida mediante otras técnicas de análisis superficial (entre varias: la espectroscopía Auger, la fotoemisión y la espectroscopía de pérdidas de energía), que nos permita reducir el número de estructuras posibles a ser investigadas.

LEED, por tanto, es un método de ensayo y error: se calculan las figuras de difracción para las diversas estructuras posibles hasta que la teoría concuerde con el experimento. Con este método se han determinado unas cien estructuras superficiales, desde la introducción del proceso de colisiones múltiples en la teoría, hacia 1968. Describiremos ahora los

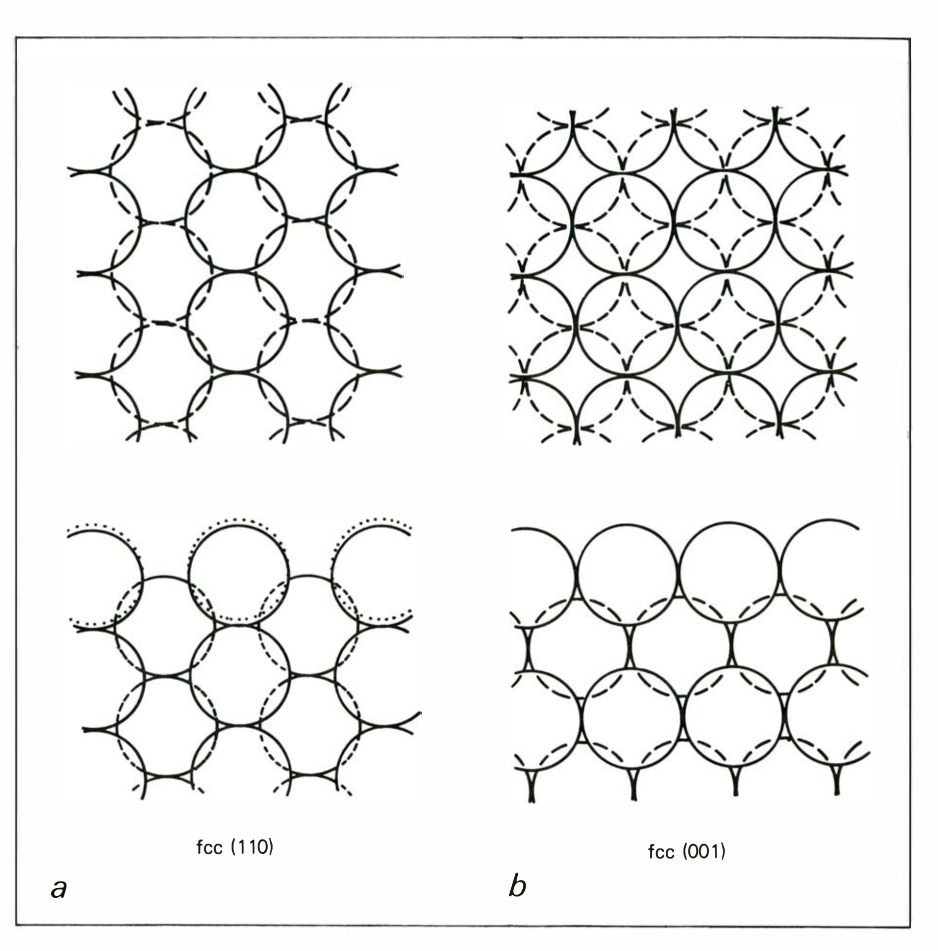




EN SUPERFICIES de cristales iónicos, fuerzas fuertes de tipo electrostático actúan sobre los átomos cargados electricamente (iones). La fuerza resultante en cada átomo depende de la geometría particular de la superficie en que se halla. En (*a*), la fuerza resultante es pequeña debido a cancelaciones mutuas; en (*b*), una fuerza fuerte dirigida hacia adentro es la resultante, lo cual explica la contracción que se observa en esta superficie.

plo de la estructura de una superficie semiconductora que aparece representado en la ilustración inferior de la página 30, la cual nos muestra la superficie (110) del arseniuro de galio [los enteros (110) describen la orientación de un plano en el espacio; la superficie es paralela a dicho plano]. La superficie en este caso tiene una estructura diferente de la que tendría en el interior del material: ha habido una reconstrucción. La causa de esto es obviamente la eliminación de algunos de los átomos vecinos de los átomos superficiales: el enlace químico entre átomos cerca de la superficie se altera con respecto al enlace del interior del sólido, favoreciendo, en este caso, la aparición de una nueva geometría. Dicha reconstrucción guarda una relación directa con la presencia o ausencia de electrones localizados en la superficie; presencia o ausencia que son de gran importancia en muchos sistemas de semiconductores, los cuales dependen de la carga superficial para su funcionamiento.

Otro tipo de materiales estudiado son los llamados compuestos iónicos. Es de esperar que presenten propiedades interesantes, pues contienen átomos con exceso de carga positiva (iones positivos o cationes) y átomos con exceso de carga negativa (iones negativos o aniones). Dichas cargas eléctricas en exceso interaccionan fuertemente. La ilustración inferior de la página 36 muestra como un desequilibrio de las fuerzas electrostáticas puede determinar la contracción de la superficie; una contracción relativamente grande del 5 por ciento de la longitud de enlace en el interior se observa en la superficie (111) del óxido de cobalto CoO (111). El error cometido con el método LEED en la determinación de dichas longitudes de enlace suele ser del orden de uno o dos por ciento de la longitud de enlace.



EN SUPERFICIES METALICAS, que constituye otra clase de superficies que ha sido extensamente estudiada, pueden ocurrir contracciones de la longitud de enlace entre los átomos del metal, especialmente en aquellas superficies donde los átomos se separan hasta un cierto punto de la superficie. Así se da en la superficie mostrada en (*a*) [llamada cara (110) de un material cúbico centrado en las caras], en la que los átomos de la superficie tienen canales vacíos por los dos lados. El caso opuesto se muestra en (*b*), donde ninguna, o poca, contracción ocurre. [Esta es la cara (100) de un material cúbico centrado.]

Asimismo, se han estudiado con cierto detalle las superficies metálicas. Aquí pueden ocurrir reconstrucciones (es decir, grandes modificaciones de la estructura) de las que poco se sabe con certeza en la actualidad. En superficies no reconstruidas, la distribución superficial de los átomos difiere poco de la distribución del interior del sólido; a lo más, se observan contracciones de hasta el cuatro por ciento de la longitud de enlace entre átomos en la primera y segunda capa.

Se han emprendido muchos estudios sobre el comportamiento de átomos "extraños" depositados en superficies metálicas. Muchas veces los átomos extraños se distribuyen regularmente a lo largo de la superficie prestándose a una investigación por medio del LEED. Es casi una regla general que los átomos extraños escogen aquellas posiciones en las que están rodeados por el mayor número posible de átomos del metal. Se trata de los lugares donde los átomos extraños pueden acercarse más a la superficie, así como de las posiciones que suelen ostentar el máximo grado de simetría. (En general, las disposiciones geométricas con el grado más alto de simetría suelen ser las más estables en cualquier sistema físico-químico.) La longitud del enlace entre átomos extraños y átomos del metal presenta valores cercanos a los conocidos en moléculas libres o en el interior de sólidos que contienen los dos átomos en cuestión [*véase la ilustración de la página siguiente*]. No debe sorprendernos este resultado puesto que, como ya hemos indicado, la superficie representa un estado intermedio entre moléculas libres y el interior de los sólidos.

Por lo que respecta al proceso de oxidación, hay dos resultados de interés especial. El oxígeno, depositado en una cierta fase de hierro, desplaza los átomos más externos del hierro, produciendo una estructura que recuerda la del óxido de hierro (FeO). Ello nos ilustra la primera etapa del proceso de oxidación. El segundo resultado se refiere al nitrógeno depositado en una cierta cara del titanio; el nitrógeno se coloca entre la primera y segunda capa del metal formando un compuesto con la misma geometría que la del interior del compuesto, formado por nitrógeno y titanio. Lo cual es, de un modo aproximado, lo que uno esperaría que ocurriese en las primeras etapas del proceso de oxidación.

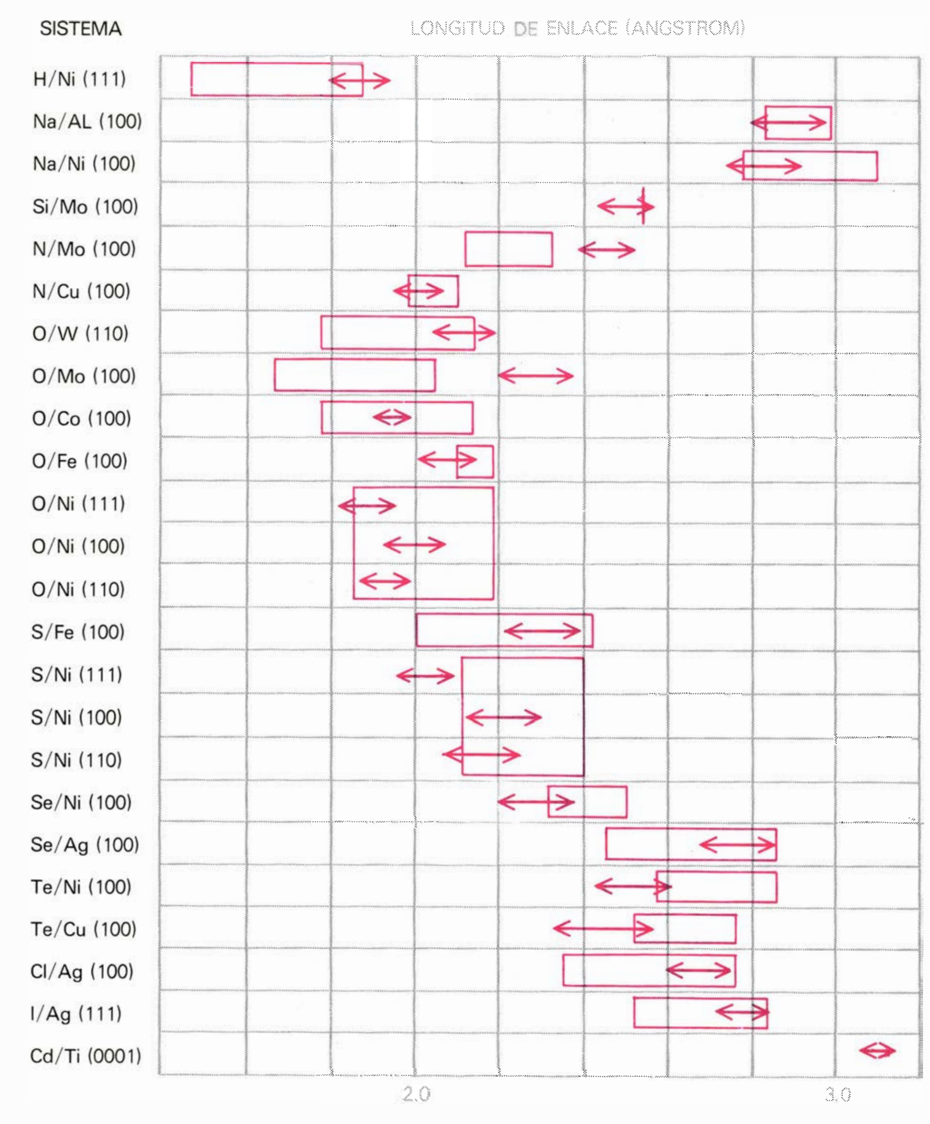
Además de la clase de los átomos extraños, se ha investigado el comportamiento de dos tipos de moléculas depositadas en superficies metálicas: acetileno (C_2H_2) en superficies de platino y monóxido de carbono (CO) en distintas superficies metálicas. Las investigaciones en este terreno son importantes para comprender la catálisis, pero queda todavía mucho trabajo por hacer antes de que podamos disponer de una idea clara de la naturaleza del proceso catalítico.

A lo largo de este artículo hemos mostrado los procesos físicos más importantes en la difracción de electrones

de baja energía así como un breve resumen de sus logros en la determinación de las posiciones atómicas en superficies. No debemos silenciar algunas limitaciones de esta técnica. En el momento actual de desarrollo del LEED, las investigaciones se concentran en características repetidas periódicamente a lo largo de la superficie; por ejemplo, la distribución regular de átomos extraños depositados en la superficie. La investigación de casos donde ocurren diversas irregularidades (conocidos con el término general de desorden) es mucho más difícil cuando se exige cierto nivel de exactitud. Además, la mayor complejidad de los procesos físicos del LEED comparados con los de la cristalografía de rayos X impide que el primer método pueda estudiar estructuras tan complejas como las que son analizadas mediante rayos X, a no ser que se introduzcan simplificaciones en la teoría que, por otro lado, van en detrimento de su fiabilidad.

A pesar de tales limitaciones, y merced a los progresos registrados en le campo de la teoría, el análisis LEED se extiende día a día a estructuras complicadas. Los resultados de la determinación estructural a través del método LEED empiezan a encontrar cada vez más aplicaciones en varios frentes: oxidación, catálisis, crecimiento de cristales, fricción y superficies semiconductoras.

Desde el punto de vista teórico, el trabajo realizado en LEED ha supuesto un gran adelanto para la comprensión de las interacciones básicas entre electrones y sólidos, ayudando al esclarecimiento de muchos problemas de la física de superficies y del estado sólido. Por otro lado, el conocimiento de las posiciones de los átomos en la superficie permite una investigación más detallada y profunda de la estructura electrónica de dichas superficies.



LONGITUD DE ENLACE entre átomos extraños, depositados en superficies metálicas, y los átomos del metal (*flechas*) comparada con los valores conocidos de dichas longitudes en moléculas libres y en el interior de compuestos que contienen los dos átomos. (*Los valores vienen dados por los rectángulos o barras.*) La superficie es un estado intermedio entre moléculas libres y el interior de los sólidos.

Ciencia y sociedad

Comunicación por paquetes

Una tecnología de las comunicaciones, relativamente poco conocida, ha revolucionado la transmisión, intercambio y distribución de datos en los últimos 15 años, según un artículo al respecto publicado por *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*. Esta tecnología, llamada conmutación de paquetes, permite que las distintas unidades de un sistema de comunicaciones (tales como la unidad procesadora central, las memorias, los canales de datos y las terminales de un sistema computador) "hablen" entre sí sin necesidad de líneas de transmisión directas o de circuitos conmutados que se extiendan entre todas las unidades. En su lugar, están conectadas en una configuración en forma de red, de modo que existen numerosos caminos indirectos que unen cada par de unidades.

El sistema de conmutación de paquetes divide un mensaje en paquetes, o pequeñas secuencias, de datos y mueve cada paquete por separado hacia un destino común. Sin embargo, cada paquete puede llegar al destino por un camino distinto. La característica clave de la red de conmutación de paquetes es que estos caminos no están predeterminados. El sistema, en conjunto, selecciona el camino mientras se está realizando el viaje basándose en los datos sobre las condiciones del tráfico en cada instante. Es como un conductor humano encaminado hacia un destino particular, pero sin ningún itinerario prefijado, que prefiere decidir en cada intersección el camino a seguir en función de la situación del tráfico en ese momento.

En las comunicaciones siempre han existido dos enfoques rivales del problema de la construcción de caminos de transmisión: la asignación previa y la asignación dinámica. El sistema telefónico y la radio comercial entran en el grupo de la asignación previa. La red telefónica es un sistema de circuitos conmutados donde se asigna previamente a cada llamada una línea de transmisión fija durante toda su duración. La radio comercial supone la asignación previa y permanente de una banda de longitudes de onda para cada estación. El sistema de correos cae en la categoría de la asignación dinámica. El camino exacto que realiza una carta desde su procedencia hasta su destinatorio no está determinado previamente; en su lugar, se toman decisiones sobre el itinerario durante el camino. Por tanto, la conmutación de paquetes no es una invención nueva en las comunicaciones, sino una extensión sofisticada de un sistema que los servicios postales vienen usando desde hace más de un siglo.

La red de conmutación de paquetes es ideal cuando se tiene un gran número de unidades y cada una de ellas realiza una demanda en el sistema relativamente pequeña pero necesita tener acceso a todo él. En estas circunstancias, la red de conmutación de paquetes es mucho más eficaz que los sistemas con asignación previa, en los que las líneas de transmisión individuales están libres salvo en ocasiones poco frecuentes de uso preasignado. Es preciso instalar microprocesadores (o microcomputadores) en todos los nudos, o intersecciones, de la red, puesto que en cada uno de ellos se ha de tomar una decisión sobre por dónde mandar el siguiente paquete. En consecuencia, los sistemas de conmutación de paquetes reducen el desaprovechamiento de las líneas de transmisión aumentando la potencia del procesado. En el año 1969, el costo de los microprocesadores de asignación dinámica caía por debajo del de las líneas de transmisión de asignación previa para muchas aplicaciones, por cuya razón se aceleró el desarrollo de los sistemas de conmutación de paquetes.

Los sistemas de conmutación de paquetes que comunican datos de entrada y salida de los computadores fueron desarrollados por vez primera para aplicaciones militares. En la década 1960-1970, la Advanced Research Projects Agency (ARPA), del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, construyó el ARPANET, primer sistema computador de conmutación de paquetes que unía un equipo de más de cien piezas. Un microprocesador situado en cada nudo de la red tomaba bloques de datos procedentes del equipo conectado a él, los dividía en paquetes de 128 bit y añadía a cada paquete la dirección de su destino. Sobre la base de una presentación de tráfico constantemente actualizada, el microprocesador enviaba el paquete hacia su destino por el itinerario menos congestionado. Siempre que el paquete alcanza un nudo, el microprocesador allí situado lo recibe, envía un mensaje de vuelta acusando recibo y vuelve a darle un itinerario adecuado a las condiciones del tráfico en ese momento.

ARPANET demostró con éxito que una red de conmutación de paquetes puede poner los recursos de cada unidad (memorias, terminales, etcétera) a disposición de las demás. El éxito de ARPANET incitó a las oficinas y laboratorios gubernamentales de los Estados Unidos a colocar redes de conmutación de paquetes para conectar los recursos de los computadores. En la actualidad se están realizando proyectos para extender las técnicas de conmutación de paquetes a la radio y a las comunicaciones vía satélite. La idea básica de los paquetes de radio es tener unas estaciones principales de forma que cada una de ellas transmita sólo en cortas ráfagas comprendiendo una banda de longitudes de onda relativamente amplia. Mediante la asignación dinámica de los canales no se desperdicia ningún espacio. Si se incorporasen en los sistemas de conmutación de paquetes los satélites de comunicaciones de radio, podrían unirse elementos geográficamente muy distantes a través de una red común. Esto significa, por ejemplo, que un centro de investigación aislado podría tener acceso a los computadores más especializados situados a una distancia considerable sin dejar líneas de transmisión "ociosas" cuando no se necesitase el acceso.

La otra crisis energética

En las naciones más pobres del mundo el porcentaje de la madera consumida anualmente que se quema como combustible se eleva al 86 por ciento. En particular, la población rural depende casi por entero de la madera y de otros combustibles no comerciales,

como son el estiércol y los restos de cultivos. La presión sobre los abastecimientos de madera a raíz del aumento de la población de estos países está originando lo que se ha denominado "la otra crisis energética", crisis que puede agravarse más y ser más difícil de superar que la motivada por la subida del petróleo. La crisis forestal se trata en *Unasylva*, revista de silvicultura publicada por la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO), de las Naciones Unidas, por J. E. M. Arnold, del Departamento de Silvicultura de este organismo, y por Jules Jongma, economista forestal holandés.

Teniendo en cuenta que la mayor parte de los datos existentes sobre el consumo de madera como combustible son sólo apreciaciones, toda vez que su tala y combustión se efectúa fuera de los canales comerciales, los autores calculan el consumo anual de madera para combustible en 1200 millones de metros cúbicos en los países en vías de desarrollo y 150 millones en los países desarrollados. "Los combustibles derivados de la madera representan los dos tercios de la energía total, excluida la energía humana y la animal, empleada en Africa, casi un tercio en Asia, un quinto en América Latina y un seis por ciento en el Oriente Próximo", afirman los autores, mientras que en los países desarrollados este nivel es tan sólo del 0,3 por ciento. En los países en vías de desarrollo, "el principal obstáculo para su sustitución por otros combustibles comerciales, incluso en pueblos y ciudades, estriba lisa y llanamente en que la gente es demasiado pobre para comprar el equipo necesario para su empleo".

La presión sobre los suministros de madera para quemar empeora la crisis por diversos motivos. Los usuarios tienen que ir más lejos para obtener la madera. Queman más estiércol y restos de cosechas, productos que podrían utilizarse en agricultura. ("La no utilización del estiércol en agricultura equivale a quemar comida para cocinar".) El descenso de la producción agrícola probablemente esté presionando para penetrar más en los bosques y convertirlos en tierras cultivables. El potencial humano necesario para la recogida de madera combustible puede crear una escasez en las labores agrícolas.

Arnold y Jongma concluyen que, en un futuro próximo, es previsible que la madera sea la principal fuente de energía para los países en vías de desarrollo, puesto que los pueblos pobres no podrán permitirse ninguna otra alternativa. Por consiguiente, centrándose en lo que puede hacerse para el mejor aprovechamiento del suministro maderero, los autores ofrecen "un cierto número de opciones". Entre ellas, quemar la madera de forma más eficaz mediante sencillas mejoras en la preparación de la madera y en el diseño de las ollas de cocina y de los hornillos. Otra opción sería convertir más madera en carbón vegetal, que no sólo se transporta mejor, sino que también puede elaborarse "a partir de los grandes volúmenes de madera en especies no comercializadas que de otra forma serían destruidos en las desforestaciones... o que se estropean en los bosques tropicales una vez talados". Una tercera posibilidad sería desarrollar plantaciones de madera para quemar. Puesto que tales plantaciones requerirían, principalmente, tierra, labor y tiempo, "podrían permitir a las poblaciones rurales pobres producir sus provisiones de combustible a un costo real aceptablemente bajo".

Mitología e historia azteca

En la madrugada del 21 de febrero de 1978 una cuadrilla de empleados de la Comisión federal mexicana de Luz y Fuerza descubrió parte de una pieza labrada con diseños en relieve, correspondiente a Coyolxauhqui. El hallazgo, fortuito, determinó que arrancara en serio el Proyecto Templo Mayor, dedicado a sacar a la luz la estructura del más famoso santuario azteca del mismo nombre. En el primer número de este año, la revista mexicana *Ciencia y desarrollo* expone ampliamente el alcance del descubrimiento y los objetivos del citado Proyecto.

La mitología azteca se interfiere con la historia, como ocurre en todas las culturas. De ahí que el conocimiento de esa pieza ayude a descifrar el pasado mexica y otros grupos dominados por aquél. Cuenta el mito que una mujer piadosa, Coatlicue, madre de los cuatrocientos surianos (o sureños) y de Coyolxauhqui, tenía como penitencia barrer el templo. Encontró un día una bola de plumas preciosas, que guardó en su seno. Cuando terminó la penitencia buscó infructuosamente la bola. Había quedado encinta de ella. Coyolxauhqui y los surianos se sintieron afrentados por la deshonra, pero Coatlicue fue reconfortada por la voz de Huitzilopochtli, quien crecía en su vientre. Cuando aquellos se aprestaban para la guerra, nace Huitzilopochtli, que mata a su hermana y a muchos de sus hermanos.

La interpretación simbólica que se da al hecho mítico es que, para los mexicas, Huitzilopochtli representaba el sol, que cada mañana nacía del vientre de su madre Coatlicue, la tierra. Decapitaba entonces a su hermana Coyolxauhqui, la luna. Atacaba luego a los surianos, a quienes destrozaba y los pocos que se salvaban huían rumbo hacia el sur, de donde toman el nombre. Carmen Aguilera, en ese mismo número de la revista antes mencionada, discrepa de la interpretación que se ha venido dando a Coyolxauhqui, quien, en su opinión, simboliza la Vía Láctea. Se apoya, para llegar a tal conclusión, en la comparación entre la indumentaria que viste Coyolxauhqui y la que portan otras deidades femeninas estelares, a saber: las *cihuateteo*, Chantico y Cihuacóal. La escultura recobrada de Coyolxauhqui nos representa a ésta con cascabeles en las mejillas, tupé sobre la frente, plumones sobre la cabellera, orejeras y narigueras de tres elementos y un penacho.

Las *cihuateteo* son las mujeres muertas en el primer parto, habitaban en el aire, acompañaban al sol desde el mediodía hasta el crepúsculo, dejándolo en el oeste en manos de los mictlecas, o habitantes del inframundo, para que hiciera su viaje nocturno y apareciera a la mañana siguiente por el oriente. Se las representaba desnudas, con tupé, mechones cortados arriba de las orejas y, en ocasiones, con nariguera de tres elementos (disco, trapecio y triángulo).

Chantico, diosa patrona de Xochimilco, aparece con el torso desnudo y nariguera de tres elementos (símbolos de fuego, sol y luz). La tercera deidad que comparte atavíos con Coyolxauhqui es Cihuacoatl, casi gemela en su porte externo a Chantico. Además Coyolxauhqui recuerda, por su penacho de dos plumas, a Mixcoatl, la divinidad de la Vía Láctea.

José L. Lorenzo esboza, en la revista citada, lo que pudiera ser la historia subyacente al mito. Huitzilopochtli, o Mexi, fue quizás un jefe real, uno de los primeros jefes aztecas, y la lucha del panteón mexica, la mitificación de una lucha cierta entre tribus o etnias. En el Templo Mayor se han encontrado abundancia de objetos que no son de manufactura mexica (explica ahora el director del Proyecto, Matos Moctezuma), sino que corresponden al área del actual Estado de Guerrero o de la mixteca; se han hallado asimismo copiosos elementos marinos, tales como caracoles, conchas, corales, tortugas, picos de pez sierra y otros, que nos hablan de la importancia del agua, además de ser posibles indicadores del tributo que de las regiones costeras se entregaba a Tenochtitlan.

Arqueología en el fondo de los lagos

Los lagos de montaña, desde Francia a Austria y desde Alemania a Italia, atrajeron a muchos colonos prehistóricos. Los arqueólogos están investigando ahora yacimientos que un tiempo fueron dragados sólo por coleccionistas

Aimé Bocquet

Uno de los cuadros más familiares de cómo vivía la gente en tiempos prehistóricos es el de los palafíticos europeos: agricultores del Neolítico y de la Edad del Bronce que vivían en casas sustentadas en pilotes sobre el agua. Este cuadro es falso y se ha sabido que lo es desde hace varias décadas. La realidad es que estos aldeanos levantaban a menudo sus casas a orillas de un lago, pero rara vez las construyeron sobre el agua, si es que alguna lo hicieron. La razón de que pareciese que lo habían hecho así es que, desde aquellos tiempos, el nivel de los lagos ha subido, sumergiendo los restos de las aldeas y situándolos a cierta distancia de la ribera.

Los arqueólogos pueden lamentar que subsista el mito del hombre palafítico, pero pueden dar las gracias a las inmersiones que han dado origen al mismo. La inmersión ha conservado muchos restos que hubieran sido destruidos hace tiempo por agentes naturales en un yacimiento en seco. Por ejemplo, los objetos de madera y los tejidos que se hubieran consumido y corrompido en estaciones de tierra seca pueden conservarse casi perfectamente en tierra bañada por el agua o sumergida. No menos importante es que otro tanto suceda a los materiales de flora silvestre y doméstica. Hace sólo una década, pocos investigadores prestaban mucha atención a los indicios que tales materiales ofrecen acerca de los diversos ambientes de las edades prehistóricas. Hoy, por el contrario, los arqueólogos valoran muy alto tal información. Puede revelar hasta dónde llegó la adaptación del hombre prehistórico al medio ambiente; y cuanto más (o menos) eficaz haya sido la adaptación del hombre prehistórico a su entorno, tanto más (o menos) quedaba asegurada su supervivencia.

El conocimiento de los ambientes prehistóricos es también requisito previo para calcular el progreso técnico del hombre y su influencia en el mundo que le rodea. Por ejemplo, un ambiente de bosque debiera inspirar la invención del hacha de leñador. Cuando un arqueólogo excava el refugio de un habitante primitivo del bosque, celebra encontrar las hachas que el leñador manejaba. Sin embargo, aun celebra más descubrir en qué clase de bosque habitaba aquel leñador, analizando los restos de la flora. Y todavía es mejor si el análisis revela qué influencia ejerció el leñador sobre su entorno, en virtud, por ejemplo, de su tala selectiva de ciertas especies de árboles. Los estudios de este género se ven facilitados por la conservación de materiales vegetales en yacimientos pantanosos o sumergidos.

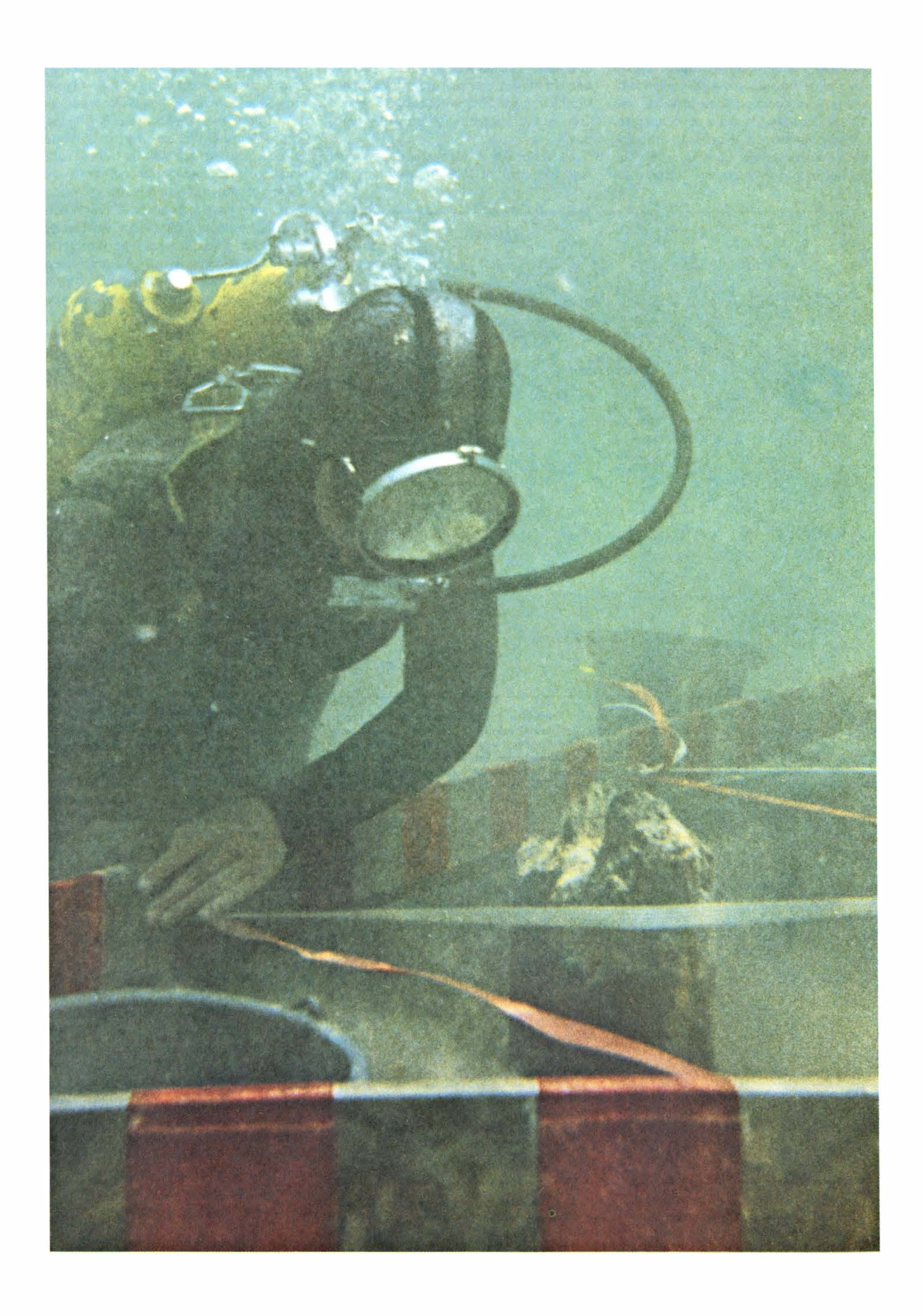
Los territorios orientales de Francia, particularmente aquellas zonas contiguas a la cara septentrional de los Alpes, abundan en lagos y orillas de lagos que fueron asiento de aldeas desde fechas tan remotas como la que va del Neolítico a la Edad Media. La mayoría de estas aldeas quedaron más tarde sumergidas; muchas se descubrieron por primera vez hace poco más de un siglo, durante una sequía excepcionalmente severa. En 1853 y 1854, el nivel de los lagos bajó en toda Europa. En el Lago de Ginebra, por ejemplo, muchas estaciones ribereñas, sumergidas desde hacía tiempo en el lado francés del lago, quedaron expuestas a la vista. Hoy el número de tales yacimientos descubiertos en los lagos de montaña de Francia ascienden a un total de 38. Se han encontrado otras aldeas semejantes, sumergidas, en Suiza central y occidental, en el suroeste de Alemania, Austria e Italia septentrional.

En los años comprendidos entre mediados de la década de 1850 y 1935 se formaron ricas colecciones de artefactos "palafíticos". Estos pueden hallarse ahora en colecciones particulares y en museos por toda Europa; pero, salvo alguna rara excepción, el modo de coleccionarlos distaba mucho de ser científico. El sistema consistía, simplemente, en sacar con una draga a la superficie los varios objetos que se hallaban diseminados en el fondo del lago o enterrados a muy poca profundidad en el cieno del mismo. Los coleccionistas operaban a menudo con ingeniosos útiles de dragado para recolectar esta peculiar cosecha.

Parte importante de este trabajo se realizaba en yacimientos suizos, como Auvernier y Cortaillod, en el lago Neuchatel, y Meilen y Wollishofen en el lago de Zurich; la contribución francesa procedía en su mayor parte del lago de Bourget, en Saboya, a medio camino entre Grenoble y Ginebra. Como si se presagiase un enfoque más académico de la cuestión, en 1929, el yacimiento sumergido de Sipplingen, en la costa alemana del lago de Constanza, fue desecado a trechos por bombeo, mediante cajones, permitiendo así aplicar los métodos de la arqueología de tierra firme a aquella excavación.

Con la invención de un equipo práctico de buceo independiente, en la década de 1940, los arqueólogos se encontraron con un medio de investigación

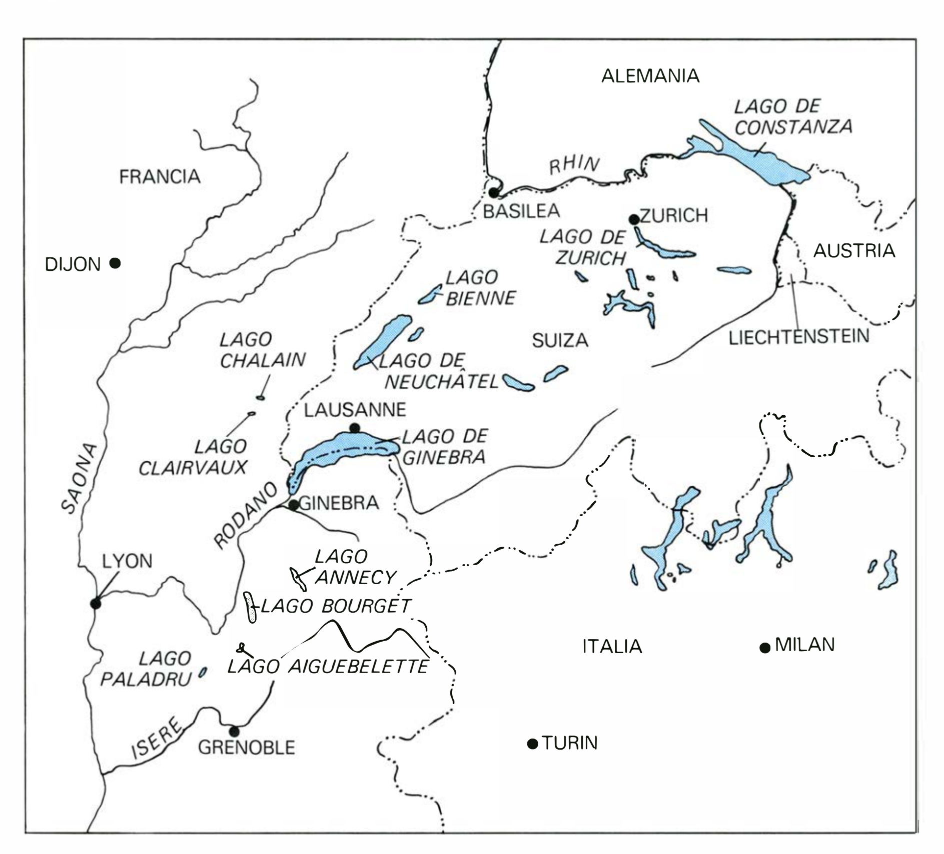
EXCAVADOR SUBACUATICO en Baigneurs, aldea neolítica sumergida del este de Francia, a quien se ve trabajando en la fotografía de la página opuesta, cerca de un vértice de un marco triangular de duraluminio. Los lados del triángulo equilátero miden cinco metros de largo. Cintas rojas y blancas subdividen el área en 25 triángulos equiláteros más pequeños; cada uno de ellos encierra un área de 430 centímetros cuadrados. Enfrente del excavador está lo que queda de un pie derecho de madera, que en su tiempo era el poste de la esquina de una casa neolítica. A la izquierda del excavador, se halla la espuerta que llevará a la superficie los restos del piso de la casa que él ha recogido después de tomar nota de sus coordenadas horizontales y verticales. La arqueología lacustre es un fenómeno bastante reciente.



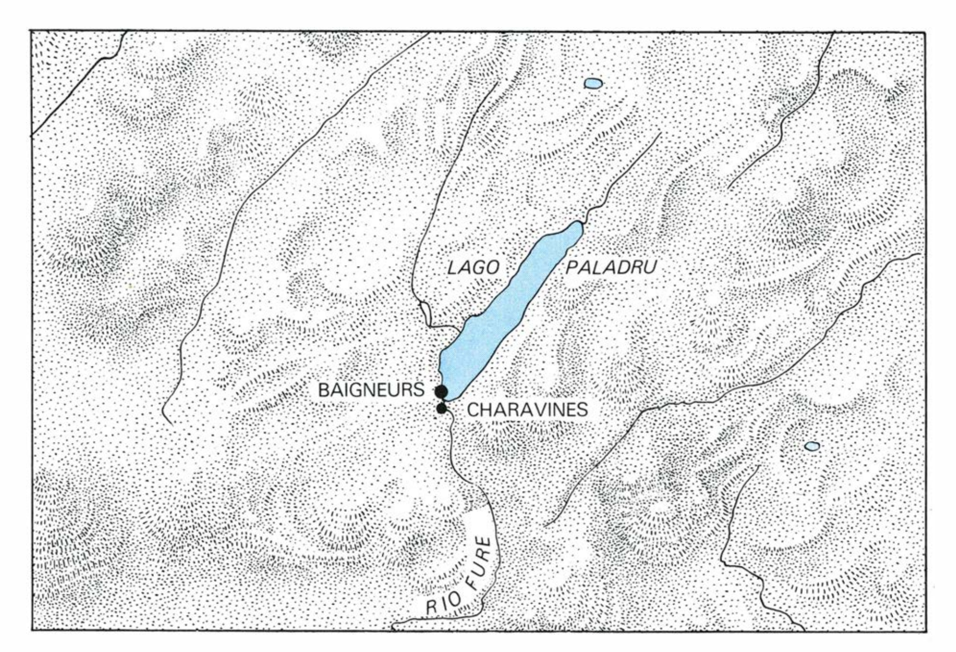
subacuática enteramente nuevo. Cierto número de buceadores aficionados empezaron a coleccionar antigüedades "palafíticas" con ayuda del nuevo aparato. A. Favre, que operó en el lago Annecy, algo al noroeste del lago Bourget, fue uno de los pioneros en este trabajo. Lo que estos buceadores realizaban no era una excavación en sentido estricto, pero significaba un notable adelanto sobre el drenaje y dragado de los primeros tiempos.

La verdadera arqueología de fondo de lago comenzó en 1952 y su pionero fue Raymond Laurent, del Centre de recherches archéologiques lacustres du Dauphiné-Savoie. Influido por las enseñanzas de un eminente prehistoriador francés, André Leroi-Gourhan, del Colegio de Francia, Laurent aportó a su trabajo subacuático una visión de conjunto de cómo preparar un yacimiento del fondo de un lago para señalar en él, con precisión, la posición horizontal y vertical de los objetos. Trabajó en el lago Bourget y en el lago Annecy, y también lo hizo en el lago Aiguebelette, un poco al suroeste del lago Bourget; sus excavaciones subacuáticas, realizadas entre 1960 y 1969, echaron los cimientos del trabajo plenamente disciplinado que hoy se lleva a efecto en el fondo de los lagos. Ya en 1963, Ulrich Ruoff realizaba investigaciones igualmente refinadas en Suiza, en el yacimiento de Kleiner Hafner, en el lago de Zurich. Al mismo tiempo, proseguía el trabajo de tono más tradicional. Por ejemplo, entre 1969 y 1972 algunos yacimientos de la zona de la Bahía de Auvernier, en el lago Neuchatel, eran excavados por buceadores, y otros lugares de la bahía eran cerrados con diques y puestos en seco para realizar excavaciones convencionales.

Mi propósito aquí es describir la arqueología lacustre como ésta es hoy en día, tomando como ejemplo un yacimiento neolítico del fondo de un lago del Delfinado, al suroeste de Saboya. El yacimiento fue seleccionado para una operación de arqueología de urgencia en 1971. El lago que un día atrajo a unos colonos neolíticos se llama Paladru; se halla a algo menos de 45 kilómetros al noroeste de Grenoble, camino de Lyon, y el concreto yacimiento costero sumergido que investigamos, dos o tres metros por debajo de la superficie del agua, es conocido por Baigneurs. Los estratos del fondo del lago en los que se encuentran los restos neolíticos fueron depositados hace unos 5000 años. Son delgados y quebradizos, razón por la que hay que excavarlos sin regatear esfuerzos.



SECTOR DE SEIS NACIONES de la Europa alpina y subalpina que contiene los muchos lagos, grandes y pequeños, que fueron elegidos por colonos del Neolítico y de la Edad del Bronce para levantar sus poblados en las orillas. La elevación del nivel de los lagos ocultó las aldeas abandonadas, hasta que una sequía a mediados del siglo XIX las dejó al descubierto, dando así pie al mito de las poblaciones palafíticas alpinas. Los lagos enumerados aquí contienen muchos de los yacimientos principales del Neolítico y de la Edad del Bronce. Sólo algunos de ellos han sido excavados científicamente.

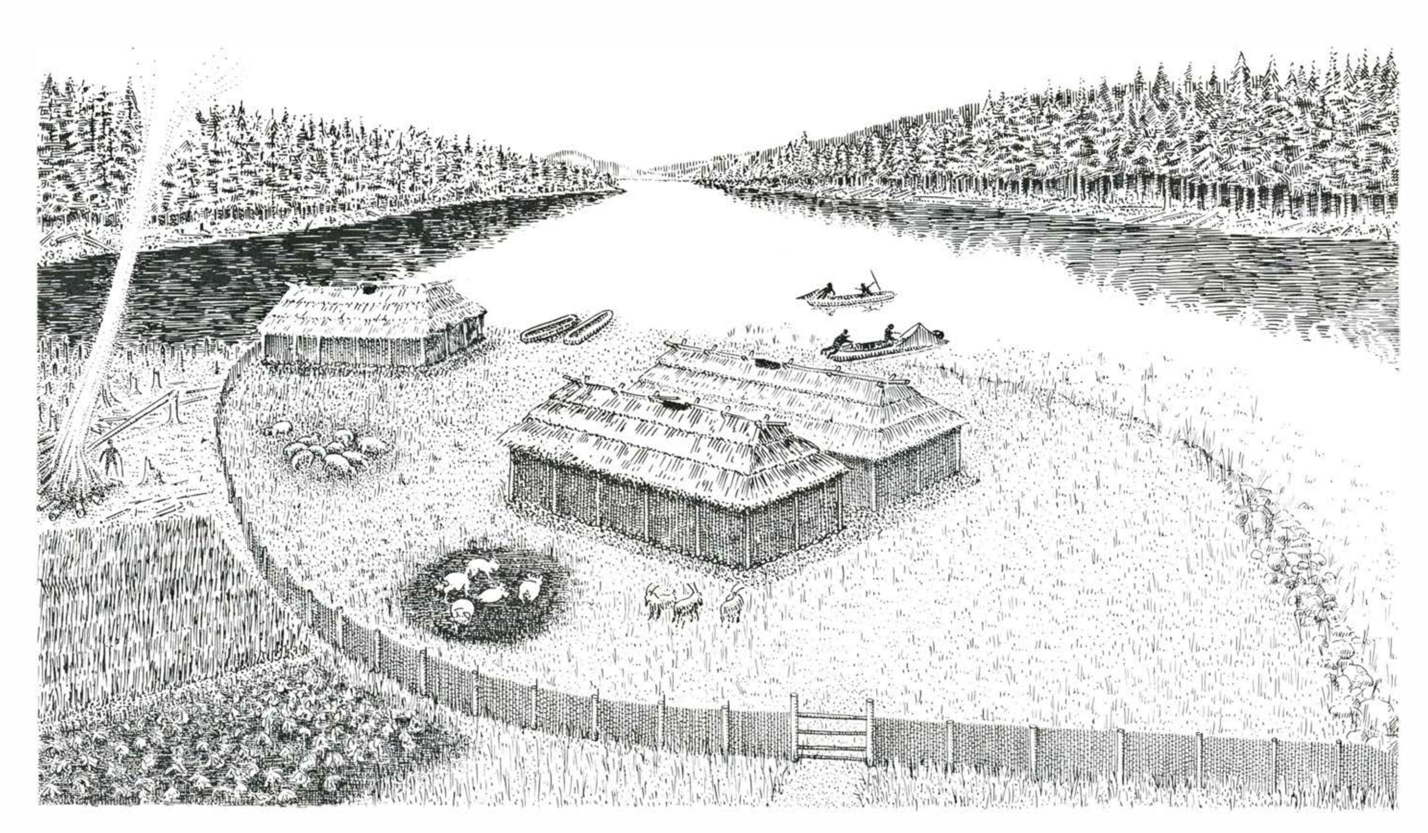


EL LAGO PALADRU, en el Delfinado, al suroeste de Lyon, da nacimiento a un afluente del Isère. Cerca de Charavines, junto al desagüe del lago, está el poblado neolítico sumergido de Baigneurs, objeto principal de la investigación. El autor y sus colegas han realizado allí campañas de arqueología de urgencia desde 1972, y dirigen un taller dedicado a las técnicas de la arqueología subacuática.

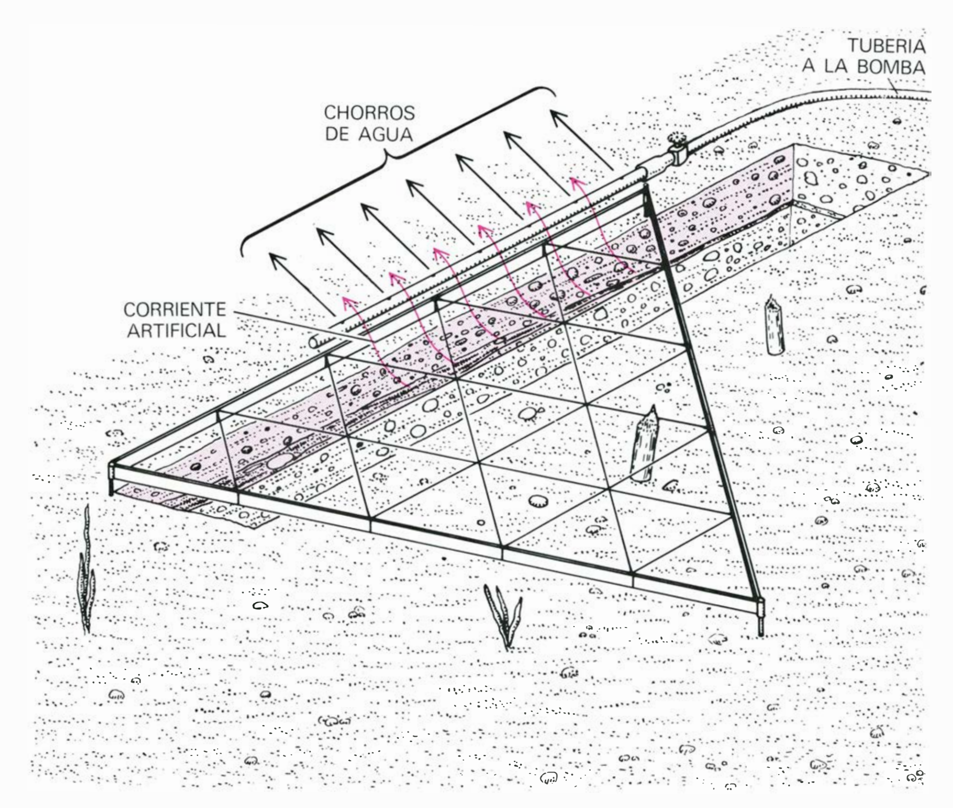
Nuestra operación de salvamento en Baigneurs estuvo basada en el sistema de Laurent para el análisis topográfico de fondo de lago; su requisito fundamental estriba en que la localización de los hallazgos ha de quedar registrada con absoluta precisión. El sistema de Laurent lleva implícito también que todos los artefactos de un estrato de fondo de lago, por pequeños o frágiles que sean, se recuperen. Nuestra propia contribución al sistema de Laurent consistió en asegurar que literalmente todos los objetos –y no sólo los hechos por el hombre– fuesen recogidos. Desde el momento en que mis colegas (Françoise Ba-

ANTERIOR ORILLA DEL LAGO
CASA
CASA
CASA
PUERTA
EMPALIZADA

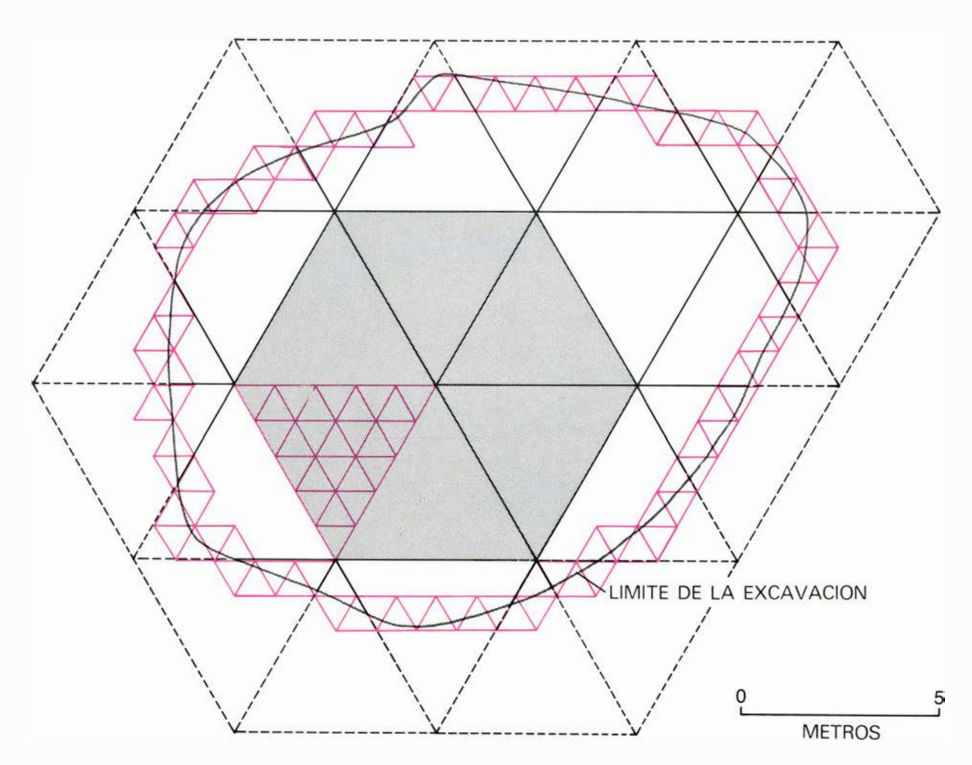
FOTO AEREA A BAJO NIVEL del lago Paladru, retocada por los excavadores para señalar la extensión de la aldea neolítica sumergida. En la preparación de la fotografía, los buceadores pusieron placas blancas de metal sobre cada uno de los pies derechos, de madera, de las casas que habían localizado en el fondo del lago, y placas rojas en los pies derechos más pequeños, también de madera, que formaban una empalizada en el perímetro de la aldea que miraba a tierra. El rotulado (*blanco*) señala una casa grande (*pies derechos rodeados de un círculo*) en el ángulo noroeste de la aldea, cerca de la antigua orilla del lago (*línea de guiones*), y otras dos casas cercanas. La empalizada y su puerta se hallan también rotuladas.



RECONSTRUCCION que sugiere el aspecto probable del primer poblado de Baigneurs después que la tercera granja se construyera allí. La empalizada no era defensiva, evidentemente, sino un medio de encerrar el ganado de la aldea cuando los animales no eran conducidos al prado y al bosque próximos para pastar. La pesca en el lago era una actividad normal, como lo demuestra el hallazgo de pesas de red y de un anzuelo entre las ruinas.



"CORTINA DE AGUA", procedimiento inventado por el buceador suizo Ulrich Ruoff en 1963, empleado en Baigneurs (principal yacimiento de investigación en que se funda lo expuesto en el presente artículo) para mejorar la visibilidad en el fondo del lago. En el diagrama, el tubo de la "cortina de agua" aparece adherido a un lado de un triángulo de cinco metros; el fondo del lago, cubierto por los seis triángulos pequeños más próximos al tubo (*color*), está siendo excavado. Una bomba sumergida suministra al tubo 60 metros cúbicos de agua por hora: el agua sale por una serie de agujeros, del tamaño de una bala, situados a distancias de 20 cm. El fluir del agua (*flechas negras*) genera una corriente local (*flechas en color*) que sirve para alejar las partículas de fango que enturbian el agua.



RETICULA SUBACUATICA, empleada para señalar la posición exacta de los materiales excavados, compuesta de triángulos equiláteros encajados entre sí. El diagrama muestra la parte del yacimiento excavada hasta ahora (*línea gris*) y el grupo interior de seis triángulos que los buceadores reunieron para formar un hexágono de 30 metros de perímetro (*tono gris*). El error acumulativo al cerrar el hexágono era de sólo siete centímetros. Triángulos adicionales, adosados a los seis centrales, abarcan todo el área de la excavación. Todos menos uno rebasan su perímetro. La subdivisión de un triángulo de cinco metros en 25 triángulos menores (*color*) se muestra aquí, en una de las unidades de excavación.

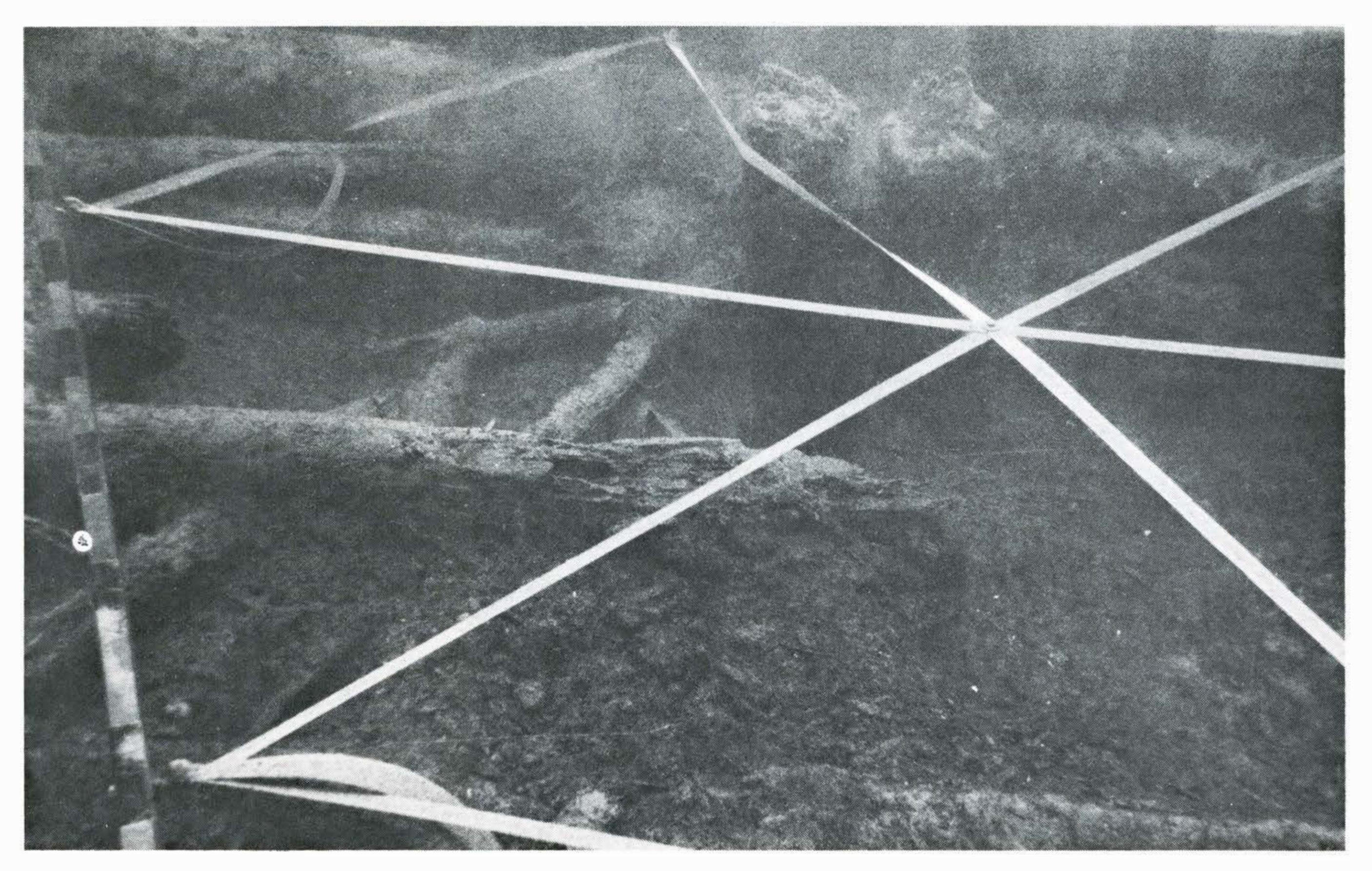
llet, Patrick Grandjean, Christian Orcel y Alain Cura) y yo empezamos a trabajar, hace siete años aproximadamente, ese ha sido un objetivo preferente. Sólo este tipo de recogida permite reconstruir los cambios ambientales de tiempos neolíticos.

El primer problema que tiene que afrontar el arqueólogo de fondo de lago son las limitaciones de visibilidad. Aún sin tomar en consideración las nubes de partículas que se levantan por el mero hecho de cavar en el fondo del lago, el radio de visión del buzo puede ser solamente de unos pocos centímetros, según los vientos de superficie, las corrientes del lago, y, especialmente, la estación. Durante gran parte del año, las aguas están turbias por las floraciones estacionales de algas y de plancton.

Esa es una de las razones por las que la cuadrícula empleada para el control de las excavaciones en tierra seca (un ajedrezado de cuadrados de un metro) es prácticamente inútil bajo el agua. Ya es bastante difícil, en condiciones de visibilidad reducida, trazar semejante cuadrícula con precisión geométrica, y más difícil aún medir la verdadera posición de un objeto dentro de un cuadrado determinado. Se han de trazar dos perpendiculares desde el objeto a dos lados adyacentes del cuadrado y registrar tanto el punto preciso de intersección como la longitud precisa de cada perpendicular.

La solución de Laurent para el problema de la cuadrícula fue sencilla e inspirada: en vez de cuadrados, utilizó triángulos equiláteros. Para situar un objeto encontrado dentro de uno de los triángulos de esta cuadrícula, basta con medir la distancia al objeto desde los tres vértices del triángulo. Esto se hace por medio de cintas aplicadas a cada uno de los vértices de la cuadrícula. Para construir la cuadrícula misma, se empieza con un solo punto conocido y tres largueros de la misma longitud. En cada vértice, los largueros se enlazan entre sí por una anilla que los sujeta a un tubo clavado en el fondo del lago. Una vez instalado el primer triángulo, la cuadrícula puede extenderse indefinidamente, añadiendo largueros entrelazados del mismo modo. La precisión del sistema se mantiene dentro de los límites necesarios. Usando largueros de duraluminio de cinco metros de longitud, para formar sucesivos triángulos, hemos podido "cerrar" un hexágono de 30 metros, compuesto de seis triángulos contiguos, con un error acumulativo de sólo siete centímetros.

Aunque los triángulos de metal trabados proporcionan una excelente cuadrícula de referencia, tanto para medicio-



GRUPO DE TRONCOS, unos de pie y otros caídos en el fondo del lago, que pueden apreciarse en esta fotografía subacuática. Las posiciones horizontales o verticales de cada tronco serán señaladas con referencia a los pequeños triángulos de cinta que subdividen la esquina del triángulo mayor visible en parte aquí. El análisis de la madera, aún protegida por la corteza en la localidad de Baigneurs revela la estación del año en que se taló.

nes horizontales como verticales, el área de cada triángulo (casi 11 metros cuadrados) es demasiado grande para una sola unidad cartográfica. Por ello empleamos cinta o cordel para subdividir cada triángulo grande en 25 triángulos pequeños, que miden un metro de lado. El área dentro de cada triángulo pequeño es mucho más manejable; es menos de la mitad del área de la unidad, de metro cuadrado, usada en la retícula convencional para tierra seca.

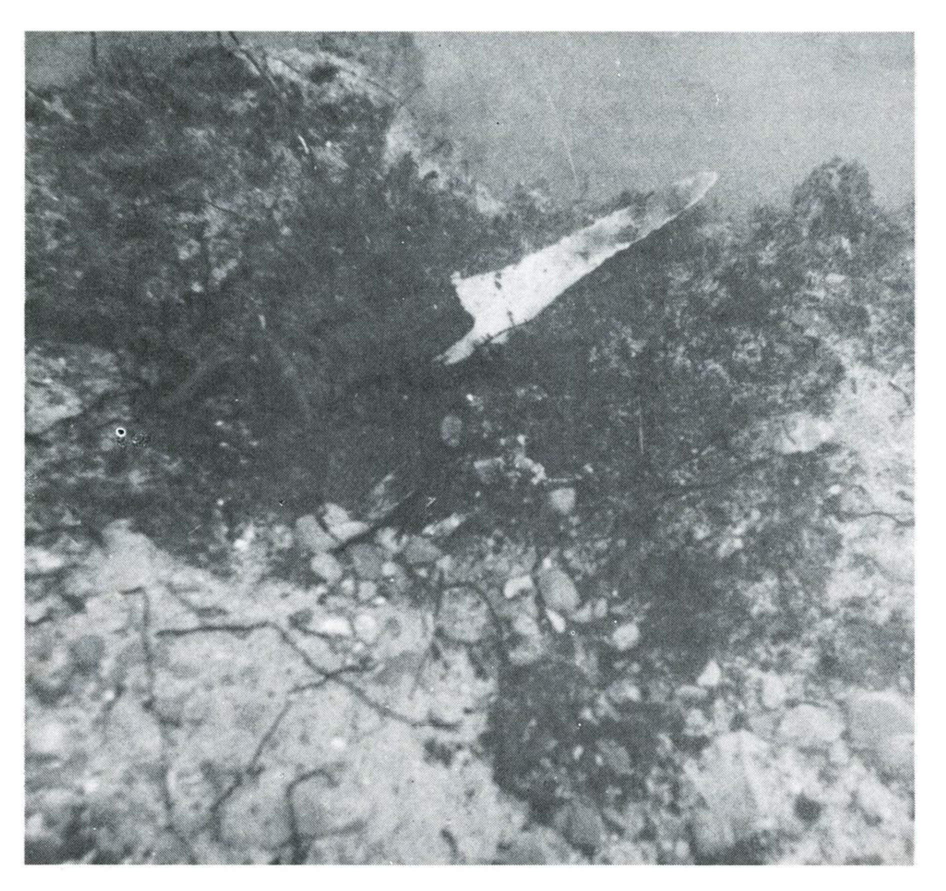
Una vez fijados bajo el agua los puntos de referencia, la excavación puede comenzar. Los buceadores pueden, dependiendo de los factores estacionales, ver mermadas sus facultades por la visibilidad naturalmente escasa, pero ya no necesitan trabajar en una nube de cieno levantada por ellos mismos. La razón es que un aparato ideado por Ruoff, a comienzos de la década de 1960, produce corrientes artificiales de agua que se llevan las finas partículas levantadas por la excavación, del mismo modo que la brisa se lleva el humo. Nosotros denominamos a la corriente creada por el aparato de Ruoff una "cortina de agua".

A los excavadores que trabajan en el fondo del lago les cabe la responsabilidad principal de lo que recogen; pero los que trabajan en la orilla, clasificando los sedimentos recogidos por los buceadores, prestan su propia contribución vital. Su labor con el tamiz extrae de los sedimentos la mayor cantidad posible de material para analizar. No es, pues, sin razón por lo que nos referimos a nuestra clase de arqueología como excavación de dos pisos.

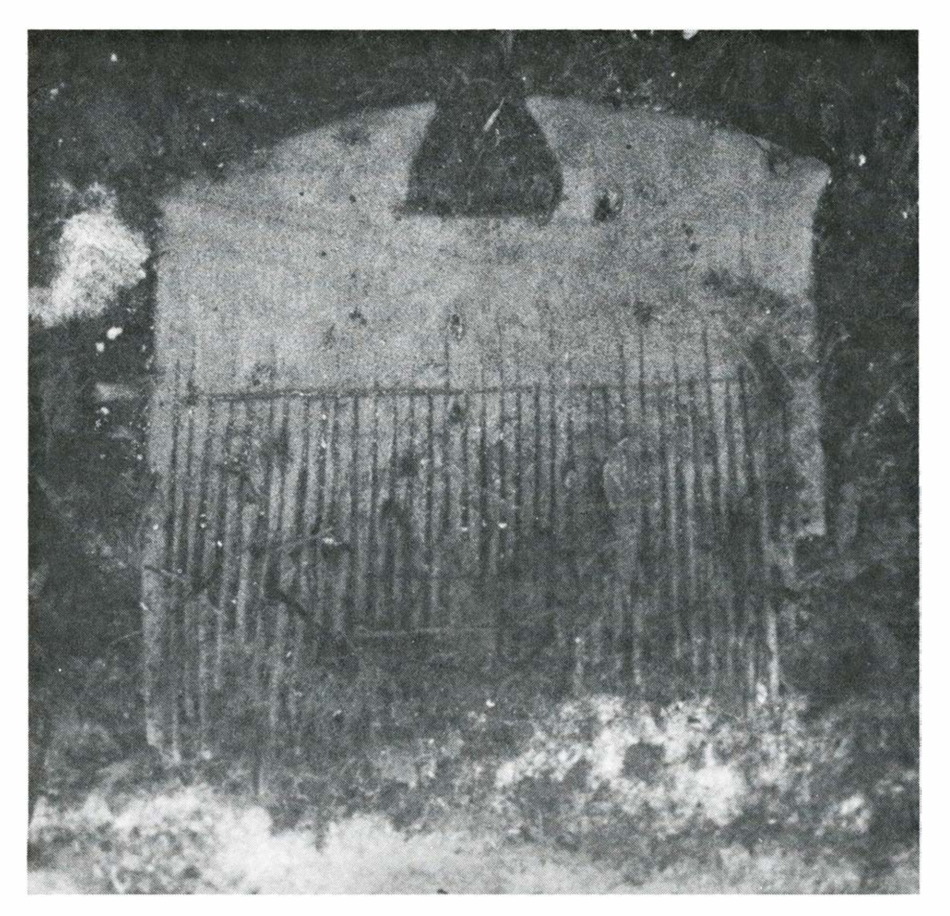
El trabajo del buceador es mucho más extenuante de lo que podría suponer quien haya buceado por esparcimiento en agua caliente y clara. Incluso la excavación en tierra seca requiere destreza y capacidad para advertir los cambios en la contextura del suelo y en el color de éste, que diferencian los estratos unos de otros. Aplicar estas mismas facultades cuando se está sumergido en agua fría y turbia sólo es posible por períodos de tiempo limitados. Lo mismo que el cuerpo se fatiga, también las facultades mentales pierden agilidad. Cometer un error, aunque sea pequeño, es arriesgarse a perder información insustituible. El excavador subacuático ideal combina la resistencia física y mental con la competencia técnica y con lo que podría considerarse un título moral: la ética científica.

La capa superior de los sedimentos del fondo del lago de Baigneurs, de un espesor que oscila entre 10 centímetros y un metro y medio, no contiene nada de interés arqueológico. Este sedimento "estéril", sin embargo, ha contribuido a conservar los materiales arqueológicos que se encuentran debajo. Antes de comenzar el penoso trabajo de excavación, el excavador extrae el sedimento superpuesto a su parcela de fondo, mediante una bomba aspirante. Después, usando sólo sus manos, levanta cuidadosamente de la superficie que ha dejado al descubierto, una tras otra, las delgadas capas de material. Sólo así puede percibir cualquier pieza de madera, hueso, paño o cerámica que el depósito suelto pueda contener, y tomar las medidas necesarias para protegerla de la destrucción.

Si las manipulaciones del buceador indican que un estrato horizontal no contiene artefactos de cierto tamaño, coloca el material en un cubo para trasladarlo a los cernedores que están en tierra. Si toca un artefacto, lo descubre con cuidado y hace de él un dibujo in situ antes de recogerlo del estrato. Si el agua está lo bastante clara y hay luz suficiente, hace también una fotografía in situ del objeto. De los objetos que descubrimos en Baigneurs, registramos de este modo la mayor parte de la cerámica, todos los útiles de pedernal, ex-



PUÑAL DE SILEX, hábilmente retocado a presión y provisto de un mango de madera. Hubo otro artefacto semejante, con mango de madera, entre los restos vegetales que cubrían los pisos de la casa.



PEINE DE TELAR, DE MADERA, uno de los varios utensilios que indican que los colonos de Baigneurs se hacían sus propias telas. Constituye uno de tantos ejemplos de cómo objetos, que pronto se hubiesen desintegrado en un yacimiento al aire libre, pueden conservarse en tierra húmeda o en emplazamientos subacuáticos. Una vez descubiertos, sin embargo, los objetos de madera han de conservarse húmedos hasta que se les aplican técnicas de laboratorio para su propia conservación.

cepto los más pequeños, todos los objetos de madera (tales como cucharas, peines, mangos de hachas y tablas pequeñas), restos de animales (tales como astas de ciervo) y dos puñales de sílex con sus mangos de madera aún en su sitio.

Cuando se descubrían materiales aún más frágiles, como los textiles, los buceadores lograban evitar perturbarlos más de lo necesario, cortando un bloque del fondo y levantándolo entero, junto con el material, a la superficie. Usamos la misma técnica a mayor escala, sacando bloques del fondo del lago que pesaban de 10 a 100 kilos, cuando queríamos conservar cortes estratigráficos enteros u obtener grandes cantidades de material para el análisis paleobotánico. Nuestros excavadores también extrajeron del fondo del lago numerosos "núcleos" altos y cilíndricos, para obtener muestras de polen para análisis de las comunidades de plantas antiguas, y muestras de conchas de moluscos para análisis de las temperaturas antiguas dominantes. Los núcleos se obtenían desde un flotador sumergiendo en el fondo un tubo de plaśtico de 8 centímetros de diámetro, de una longitud de dos a tres metros, y muy pesado en su extremo superior.

La mitad superior de nuestra excavación de dos pisos difiere en varios aspectos de la arqueología de tierra seca. El tipo de cernido que hacemos es el habitual, pero muchos de los objetos que nuestros cernedores recogen son orgánicos, por ejemplo, artefactos de madera y material botánico, como semillas. Estos objetos se han conservado por haber estado sumergidos; si los pusiéramos a secar los destruiríamos. Una vez que los objetos están numerados, pesados y registrados en una tabla, se les cierra herméticamente en bolsas de plástico para conservarlos húmedos. Incluso fragmentos de cerámica, que normalmente son indestructibles, pueden necesitar un baño de acetato polivinílico para evitar que se desintegren al secarse.

Cuando un depósito arqueológico contiene muestras de madera, como sucede en Baigneurs, existe la posibilidad de calcular la fecha absoluta del depósito. En los últimos años se han hecho grandes progresos para establecer la correlación entre los años del calendario y las fechas indicadas por las secuencias de los anillos de los árboles y la desintegración del carbono-14. En el Nuevo Mundo, el cálculo basado en los anillos o aros del tronco de los árboles ha alcanzado con garantía una fecha más antigua que el 5000 a.C. En el Viejo Mundo, el mejor cómputo de este tipo, la cronología

Tréveris, sólo se remonta a alrededor del año 800 a.C. Las secuencias de anillos de árbol también existen para períodos anteriores, como el Neolítico, pero éstos no están aún enlazados con las cronologías más recientes. De ahí que, en general, los únicos cómputos de edad para estas cronologías "flotantes" sean las del carbono-14.

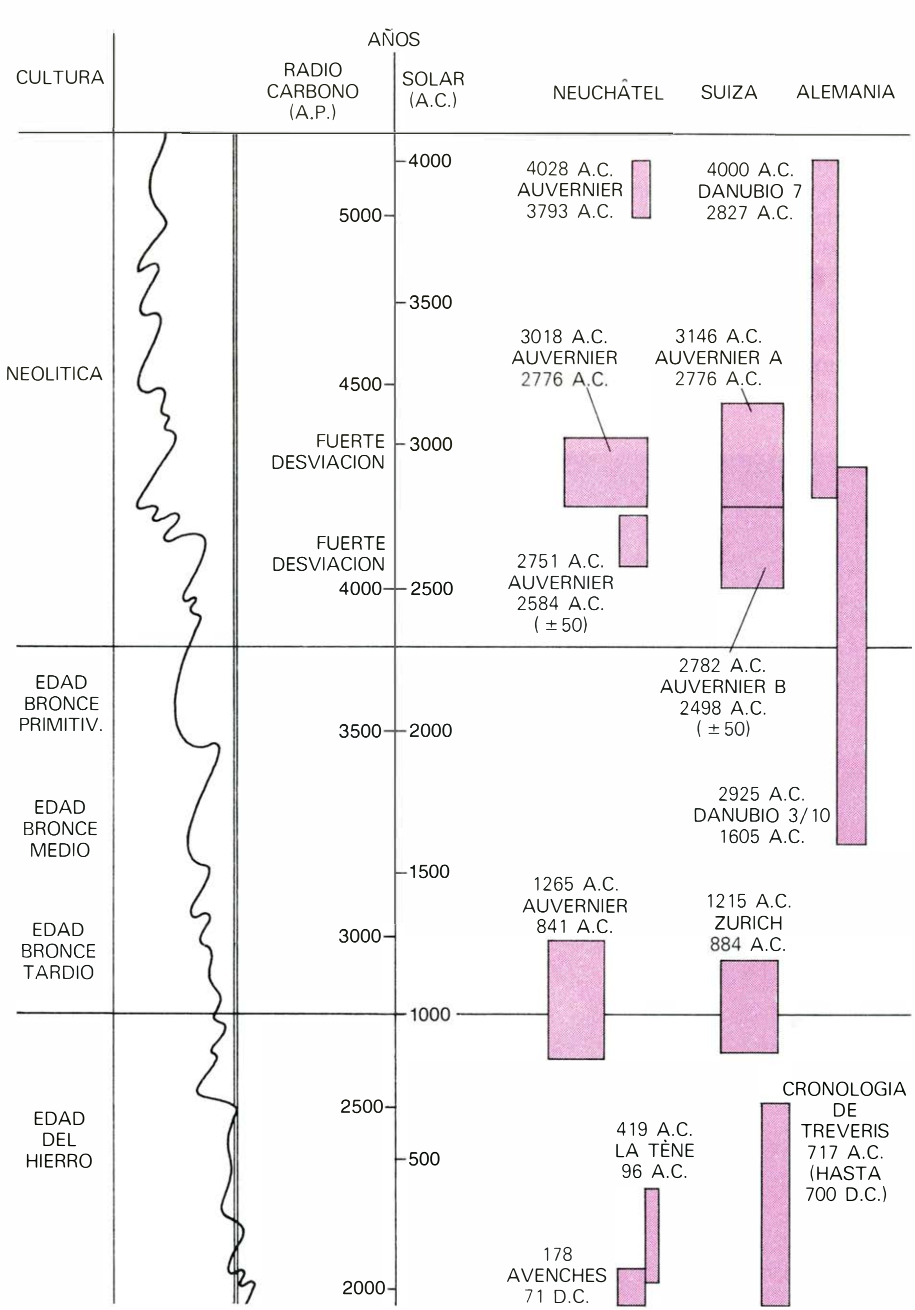
Pero si varios cálculos flotantes pueden ponerse en correlación, las diferencias cronológicas absolutas entre ellos pueden expresarse en años solares verdaderos, mejor que en años de carbono-14 a.p. (antes del presente). Este tipo de trabajo está siendo realizado en el Laboratorio de Dendrocronología de Neuchatel, bajo la dirección de mis colegas Orcel y Lambert. Los datos de los anillos de árbol de Baigneurs están siendo ahora incorporados a la cronología de anillos de árbol, en curso de expansión, de Suiza occidental, aunque este trabajo tropieza con obstáculos tales como el hecho de que gran parte del material suizo se basa en muestras de roble, y el nuestro se basa en muestras de abeto. El resultado, en conjunto, es que podemos hablar acerca de las estaciones de Baigneurs con una precisión cronológica que hubiera sido imposible hace unas décadas.

Entre las muestras de madera de Baigneurs hay postes y vigas de casas que conservan todavía la corteza, lo que permite una precisión aún mayor. La secuencia de anillos de árbol señala el año en que un árbol fue derribado. La corteza, cuando se conserva, protege el último anillo, frágil excrecencia exterior. Examinada al microscopio, esta excrecencia en proceso de desarrollo permite determinar si el árbol fue talado en invierno o en verano, en primavera o en otoño. Lo ideal sería que todas las maderas de una casa que tuviesen más de siete u ocho centímetros de diámetro proporcionasen muestras de la secuencia de anillos, y que todas estas secuencias fuesen sometidas a interrelación. Así lo hemos hecho desde 1974, y a finales de la campaña de 1978 nuestros 150 metros cuadrados de excavación han proporcionado material para 810 muestras individuales de anillos de árbol.

Además de la contribución a la cronología prestada por estos postes y vigas antiguas, otros restos de plantas proporcionan datos sobre la vida de los colonos neolíticos que talaron el bosque en este lugar. Ellos derribaron los abetos y los fresnos, pero dejaron a los robles en pie, probablemente porque valoraban las bellotas. También protegieron otros árboles del tipo del nogal, limpiando la vegetación que crecía a su alrededor para que les diese el sol. Como resultado, las nueces recolectadas de estos árboles protegidos alcanzaban un tamaño doble que las de sus vecinos desatendidos.

Nuestra recolección a fondo de restos de plantas nos ha permitido también comprobar los diferentes usos que se hacían de los diferentes materiales. Por ejemplo, los habitantes hacían camas de ramas de abeto y tapaban con musgo las grietas de las paredes de las casas. Podemos incluso señalar por dónde iba la línea de las paredes de la casa, gracias a la acumulación de cáscaras de avellanas a lo largo del interior de la pared. El análisis del carbón de los hogares indica que la leña preferida por los colonos era la de haya y la de roble.

Los habitantes neolíticos de Baigneurs eligieron, para construir sus viviendas, un cabezo próximo al desagüe del lago Paladru. El poblado ocupaba un área de unos 1500 metros cuadrados, que descendía hasta la orilla del lago. Por el lado de tierra, la aldea estaba rodeada de una empalizada que incluía una puerta. Un verdadero bosque de postes en el centro del recinto revela el



CRONOLOGIAS DE ANILLOS DE ARBOL para Europa. Se extienden desde aproximadamente 4000 a.C. hasta el presente, pero no forman una secuencia ininterrumpida. Las tres secuencias más largas son la cronología de Tréveris, que alcanza más o menos desde 750 a.C. hasta 700 d.C., y dos cronologías del Danubio que se superponen por un extremo, y van de 4000 a.C. a 1500 a.C., en números redondos. Las dataciones de anillos de árbol de Baigneurs corresponden a la cronología suiza, la de Auvernier, que abarca unos 250 años empezando hacia 3000 a.C. Para una gran parte del período comprendido entre 5000 y 1000 a.C., los cálculos de edad basados en el carbono-14 dan fechas más recientes que los anillos de árbol. Por ejemplo, muestras del 3000 a.C. (hace unos 5000 años) señalan como fecha, con el carbono-14, alrededor de 4400 a.p. La línea sinuosa a la izquierda presenta la discrepancia del carbono-14, según Hans E. Suess, de la Universidad de California en San Diego.

esquema de un conjunto de pequeñas casas rectangulares, unas al lado de otras, a lo largo de estrechas calles.

El emplazamiento de la aldea estuvo ocupado no una vez, sino dos. El primer estrato de ocupación está separado del segundo por una capa de cieno que se depositó durante una subida temporal del nivel del lago. Los primeros ocupantes entraron en escena hacia 2900 a.C. Eran agricultores que habían vivido al parecer en una aldea cercana; el herboso cabezo, con el espeso bosque de abetos en sus cercanías, evidentemente les encantó. Vinieron en invierno, y en preparación de su retorno derribaron unos cuantos abetos pequeños, cuyos troncos medían de 10 a 14 centímetros de diámetro. Les arrancaron las ramas y los clavaron en el suelo.

Los visitantes regresaron el invierno siguiente. Talaron más abetos y construyeron la primera casa, usando estos árboles y los que habían derribado el año anterior. La casa, de 12 metros de largo y cuatro de ancho, estaba orientada con su eje mayor de este a oeste. Constaba de una sola habitación, con un hogar de barro y una puerta en la pared del lado norte. Los troncos de abeto formaban la armadura de la casa, hincados en agujeros de tres a cuatro metros de profundidad. Troncos de menor diámetro formaban las vigas horizontales; éstas iban atadas a los postes verticales por medio de cuerdas y mimbres. El techo que cubría este tosco armazón se cubría probablemente de juncos; las paredes eran de finos palos verticales, de dos a tres centímetros de diámetro, con las puntas metidas en una trinchera de escasa profundidad. Aunque se elegía el abeto para los pies derechos, muchos de los palos de las paredes eran ramas de avellano. Las ranuras entre los palos se rellenaban de musgo y de juncos. Se puede suponer que los constructores de la casa quemasen la zona que habían talado, a fin de preparar el suelo para el cultivo, pero no es posible saber si sembraron ya la primavera siguiente.

Una segunda casa, idéntica a la primera, fue construida el invierno siguiente. Estaba situada al sur de su predecesora, y separada de ella por un callejón de sólo 1,20 metros de ancho. La puerta de la casa, situada en su pared norte, daba a este callejón. Hoy el viento dominante en el lago Paladru es el del norte; la orientación este-oeste de la casa neolítica sugiere que hace 5000 años el viento dominante soplaba del este.

Con la construcción de la segunda casa, la estación neolítica parece haber quedado firmemente establecida. Estaba destinada a ser ocupada durante unos 30 años. Los numerosos artefactos que hemos sacado del fondo del lago nos permiten reconstruir con cierta confianza la vida diaria de los aldeanos. Los útiles de piedra son menos abundantes de lo que podría esperarse de una ocupación de 30 años. Hechos de núcleos de pedernal que se encuentran en la localidad, están conformados toscamente en su mayor parte, aunque unos cuantos, incluidas hojas y raspadores, muestran un elegante retoque a presión; así ocurre también con los dos puñales de sílex que recobramos, con sus mangas de madera intactos. Algunos de los otros instrumentos de sílex también mostraban señales de mangos de madera.

La mayor parte de los recipientes que han sobrevivido son vasos de arcilla, de forma sencilla y no demasiado bien cocidos. Trozos de cestería indican que los aldeanos no dependían sólo de la cerámica para almacenar. Los fragmentos de tejidos dan prueba de la existencia de telares, como también lo hacen las agujas, muchos ovillos de hilo, peines de telar, de madera, y husos de madera aptos para el hilado de lana y de lino. La variedad de estos artefactos indica claramente que los aldeanos preferían confeccionar sus propios tejidos antes que importar paño.

Entre otros instrumentos hechos de madera se encuentran cucharas que se confundirían fácilmente con las cucharas de palo actuales. La capacidad de los aldeanos como leñadores, evidente en la construcción de sus casas, se manifiesta también en una serie de mangos largos de hachas. Uno de ellos todavía tenía la hoja de piedra pulimentada. Otros mangos estaban sin duda forrados de astas de ciervo, para aminorar el efecto de los hachazos.

¿Qué comía esta gente? Aunque eran colonos, no dependían exclusivamente de alimentos cultivados. Los huesos de animales que hemos recuperado indican que solían cazar ciervos y, en ocasiones, osos incluso. Pequeñas puntas de sílex para proyectiles sugieren que también practicaban la caza menor, pero los huesos de estos animales no han sobrevivido. Los aldeanos pescaban en el lago; hemos encontrado pesas de red, de piedra, y trozos de redes (y un

CORTE ESTRATIFIGRAFICO del fondo del lago en Baigneurs, mostrando, de arriba abajo, en nivel superior de sedimentos que resultó estéril, o carente por completo de artefactos (*zona clara*); un estrato conteniendo el detritus de la segunda ocupación neolítica (*capa obscura gruesa*); un segundo nivel estéril, de sedimentos, que separa la segunda ocupación neolítica de la primera (*clara*); un primer estrato, muy delgado, de restos de ocupación (*obscuro*), y finalmente, por debajo, el fondo del lago, estéril. Incrustado entre el fondo del lago y el primer estrato se aprecia una piedra de molino plano, hecha de granito.

solo anzuelo de cobre, aunque el año 3000 a.C. es una fecha muy anterior a que la edad del metal comenzase en esta parte del mundo). Con sus animales domésticos, y quizá los de sus vecinos, los aldeanos completaban su dieta de carne con vaca, cordero, cerdo y cabrito.

Con sus plantas domesticadas –trigo y centeno– los aldeanos molían una harina basta, con la cual cocían unas tortas aplanadas; efectuaban la molienda con piedras de granito. Cultivaban el lino; aunque lo hacían con el propósito de obtener la fibra, es posible que también apreciasen sus semillas aceitosas. Recolectaban numerosas plantas comestibles silvestres. Amén de las bellotas y avellanas que he mencionado, recogían nueces, zarzamoras, ciruelas y manzanas silvestres.

Debieron haber cocido sus tortas en los hogares de barro, y asado la carne al fuego directo, si bien conocían el arte de hervir con piedras. Para este tipo de cocina, se llena en parte una olla de agua y se calientan al fuego unas piedras, hasta ponerlas casi al rojo. Las piedras calientes y el alimento se meten juntos en la olla, donde las piedras hacen hervir el agua. El enfriamiento repentino rompe a menudo las piedras. Esta gente usaba guijarros de cuarcita como piedras de hervir y sus hogares quedaban materialmente cubiertos de trozos de cuarcita.

En el noveno invierno de su estancia, los aldeanos reconstruyeron por completo la primera casa. Nueve años más tarde, reconstruyeron las dos. El plano siguió siendo el mismo: un rectángulo, con un hogar central. En aquellos 18 años, el nivel del lago Paladru puede haber fluctuado ligeramente, como consecuencia de las variaciones del clima; y en alguna ocasión pudo llegar a mojar los suelos de las casas. Pero no hubo una inundación importante; el poblado fue destruido por fin, pero no por el agua, sino por el fuego.

No podemos decir exactamente cuándo se quemaron las casas. El incendio difícilmente pudo producirse pasados unos 30 años de la fundación del poblado. Para entonces, habría quedado muy poco que quemar: la máxima vida de este tipo de casa de madera, en un emplazamiento ribereño, es de sólo 15 años. Al mismo tiempo, nuestro registro de anillos de árbol indica que ocurrió en algún momento posterior al año 19 del poblado. Hemos recuperado el poste de una casa, con anillos de crecimiento que llegan a ese año; evidentemente, este poste fue una adición posterior a una de las casas.

El carácter de la colonia botánica que invadió el poblado al quedar éste abandonado, era distinto del de los primitivos abetos. El bosque estaba ahora más abierto a la luz del sol. Entre los abetos crecían alisos, olmos y fresnos. Conforme el bosque se adelantaba, el nivel del lago crecía. Con el tiempo, el agua llegó a estar quizás a 1,5 metros sobre su anterior nivel, y las ruinas quemadas quedaron cubiertas de una delgada capa de cieno. La capa de cieno fue entonces colonizada por sábanas de juncos que crecían a lo largo de la nueva orilla.

Unos 60 años después de la fundación del primer poblado, en un período en que el lago Paladru había bajado a su nivel primitivo, un segundo grupo de colonos neolíticos se estableció en aquel mismo sitio, cerca del desagüe del lago. El estilo de su cerámica y sus artefactos de sílex eran los mismos que los del grupo anterior; es incluso posible que los ahora llegados fuesen descendientes de los agricultores originarios. Aun así, las casas que construían eran más pequeñas y de planta más próxima al cuadrado. Algunos hogares de barro que perduraban fueron usados por los recién llegados, pero en general las casas que construyeron en el cabezo estaban emplazadas más al azar. Si hay alguna diferencia entre los dos grupos, aparte del tamaño de las casas, es que los primitivos colonos pavimentaban las suyas con ramas de abeto y con helechos, mientras que sus sucesores las solaban a veces con corteza. Pero, por lo que se refiere a medios de subsistencia y género de vida, los dos poblados eran iguales.

Los estudios de la cerámica y de los artefactos de sílex indican que esta población lacustre era miembro de una comunidad ampliamente distribuida, cuya tradición cultural florecía en el oeste de Suiza, en las montañas del Jura, en el valle de Saona, en Saboya y en el norte del Delfinado. Entre los prehistoriadores europeos esta cultura se conoce como civilización del Saona-Ródano. Los miembros occidentales de este pueblo tenían estrechas relaciones con los granjeros neolíticos del sur de Francia; los más cercanos a Suiza, y los de dentro de ésta, tenían vínculos similares con los colonos neolíticos de Europa central. Los análisis del carbono-14 sitúan los yacimientos de Baigneurs en una primitiva fase Saona-Ródano, fechada hacia 2900 a.C. Asentados por casualidad a un extremo del lago Paladru, los dos poblados abarcaron un período de unos 90 años antes de que el segundo de ellos fuese abandonado sin una razón aparente. A partir de entonces, una subida del nivel del agua convirtió la orilla del lago en fondo del lago y las ruinas de Baigneurs permanecieron imperturbadas durante cinco milenios.

Silvicultura

La gestión de un bosque mediante técnicas tales como la recolección selectiva de árboles, las entresacas prudenciales y la reforestación planificada puede duplicar y hasta triplicar la productividad del mismo

Stephen H. Spurr

Del mismo modo que la agricultura es el cultivo de los campos, la silvicultura (del latín *silva* o *sylva*, que significa bosque) es el cultivo de los bosques. Se practica mucho más ampliamente la agricultura que la silvicultura; pero si los bosques del mundo han de figurar entre los recursos renovables del globo, tendría que acudirse a la silvicultura de una manera mucho más amplia e intensiva de lo que hoy se hace. La recompensa puede ser sustancial. Contando con las limitaciones de la ecología, la economía y la política, puede calcularse todavía que la aplicación de principios silviculturales demostrados puede duplicar, y quizá triplicar, la productividad de los bosques comerciales de los Estados Unidos en el espacio de 50 años.

Los continentes e islas del mundo suman unos 13.300 millones de hectáreas; aproximadamente un tercio de esta superficie, es decir 4100 millones de hectáreas, está clasificado como zona forestal por la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas. En la mayor parte de las principales regiones, con excepción de Asia y el Pacífico, el bosque ocupa por lo menos una cuarta parte de su extensión; en Norteamérica, Sudamérica y la Unión Soviética el total es de más de un tercio. En los Estados Unidos están clasificadas como bosque 305 millones de hectáreas (una tercera parte de su superficie continental). Unos 202 millones de estas hectáreas pueden clasificarse como bosques maderables comerciales, según la definición establecida por el Forest Service de los Estados Unidos: tierra capaz de producir por lo menos 1,4 metros cúbicos de madera por hectárea y por año, y en la que no se halle legalmente prohibida la recolección de madera, como lo está en las zonas naturales designadas por el Congreso. El hecho de que una zona determinada esté clasificada como bosque maderable no significa necesariamente que en ella se beneficie madera ni tan siquiera que tenga árboles, sino tan sólo que puede producir madera al ritmo indicado.

Otra norma que emplea el Forest Service define la madera como los troncos comerciables que tienen por lo menos 13 centímetros de diámetro a una altura de 1,40 metros sobre el suelo; la definición comprende toda la madera situada por encima de un tocón de 30 centímetros y extendiéndose hacia arriba hasta el punto en que el tronco tiene menos de diez centímetros de diámetro. Según esta definición, cerca de la mitad de la biomasa que produce un bosque es madera utilizable. Debe tenerse en cuenta que el bosque encierra otros muchos valores, a la mayoría de los cuales no se les puede poner un precio. Los procesos respiratorios de los árboles del bosque desempeñan en conjunto un papel importantísimo en la extracción de anhídrido carbónico de la atmósfera y en la adición de oxígeno a la misma. Los bosques son la fuente principal de agua dulce, puesto que ocupan la mayor parte de la superficie del globo que no está helada, y en la que la precipitación es superior a la evaporación. En todas partes, los bosques representan una importante fuente de alimentos tanto para el ganado doméstico como para los animales salvajes. También proporcionan mucho espacio y oportunidades para las actividades recreativas humanas.

Tipos de bosque

Se tiende a pensar que un bosque consiste en gran variedad de árboles que se han establecido a través de los efectos más o menos aleatorios de las fuerzas naturales. En realidad, un bosque suele estar formado por un número bastante limitado de tipos de árboles, sobre todo porque las condiciones de temperatura, pluviosidad e iluminación son favorables para determinadas especies y desfavorables para otras. En aquellos lugares en los que la gestión del hombre se ha hecho sentir de manera intensa, un bosque puede estar formado por una única especie de árbol.

Debido a los efectos ambientales, es posible clasificar los principales tipos de bosques del mundo en un número de grupos relativamente reducido. Los bosques de las regiones de latitudes elevadas del hemisferio norte, el llamado bosque boreal, están dominados por coníferas (árboles perennifolios de madera blanda o de hojas en aguja) tales como piceas (*Picea*), abetos (*Abies*) y alerces (*Larix*). En las latitudes medias del hemisferio norte, los bosques tienden a estar formados por coníferas, como los pinos (*Pinus*) y el abeto de Douglas (*Pseudotsuga menziesi*), y por árboles caducifolios o deciduos (de hoja ancha, o de madera dura), en especial robles (*Quercus*), hayas (*Fagus*) y arces (*Acer*). Cerca del ecuador se encuentran los bosques pluviosos tropicales, en donde predominan los árboles perennes de hojas anchas (una gran variedad de especies), que están adaptados a condiciones cálidas y húmedas.

En los Estados Unidos, las Great Plains dividen los bosques del oeste, formados predominantemente por coníferas, de los bosques mixtos del este, con coníferas y árboles caducifolios. A lo largo de la costa del Pacífico, las principales especies arbóreas son la picea de Sitka (*Picea sitchensis*), la tsuga occidental (*Tsuga heterophylla*), el abeto de Douglas y, en California septentrional, la secoya (*Sequoya sempervirens*). Tierra adentro, hasta las cumbres de las Cascades y de Sierra Nevada, el abeto de Douglas es la especie más abundante, con cedros (*Juniperus*), el abeto verdadero, las *Tsuga* y otras coníferas que forman bosques mixtos diversos que dependen del suelo, de la elevación y de la precipitación.

Desde las laderas orientadas a levante de estas montañas y hacia el este, hasta las altitudes más elevadas de las montañas Rocosas, los pinos ponderosa (*Pinus*



BOSQUE CREADO POR EL HOMBRE, en Nueva Zelanda. El Kaingaroa State Forest, cerca de Rotorua, es administrado por el Forest Service. Plantado hace unos 40 años sobre aproximadamente 120.000 hectáreas de tierras abiertas, es uno de los mayores bosques artificiales del mundo. La principal especie plantada es el pino de Monterrey *(Pinus radiata)*, que en estado natural se encuentra sólo en California. Los árboles se talan cuando tienen entre 20 y 30 años de edad y se les destina a gran variedad de usos. La zona recientemente talada del centro izquierda va a ser replantada.

GESTION DE LA SILVICULTURA, que se hace evidente en este bosque cercano a Umtali, Rhodesia, administrado por la Forestry Commission de Rhodesia. Los árboles son pinos *(Pinus patula)* que se plantaron originariamente a una densidad bastante elevada de 1700 individuos por hectárea. Fueron podados a las edades de cuatro y cinco años y entresacados a la edad de cuatro años, dos antes de que se obtuviera esta fotografía. Se harán entresacas adicionales a los 12, 18 y 25 años. Los árboles serán recolectados, para su uso como madera de construcción, a la edad de 30 - 35 años.

PLANTONES DE PINO que crecen en un vivero de Tailandia, destinados a ser trasplantados a un bosque. Los plantones son de *Pinus kesiya,* una especie indígena de Tailandia, y se crían dentro de un programa administrado por el Royal Forest Department para establecer grandes plantaciones forestales en tierras agrícolas que han sido abandonadas y en tierras de bosque que han sido taladas. La edad de los plantones es de unos seis meses, lo que significa que ya están casi listos para su trasplante. El gobierno promueve bosques gestionados que proporcionen madera para pulpa.

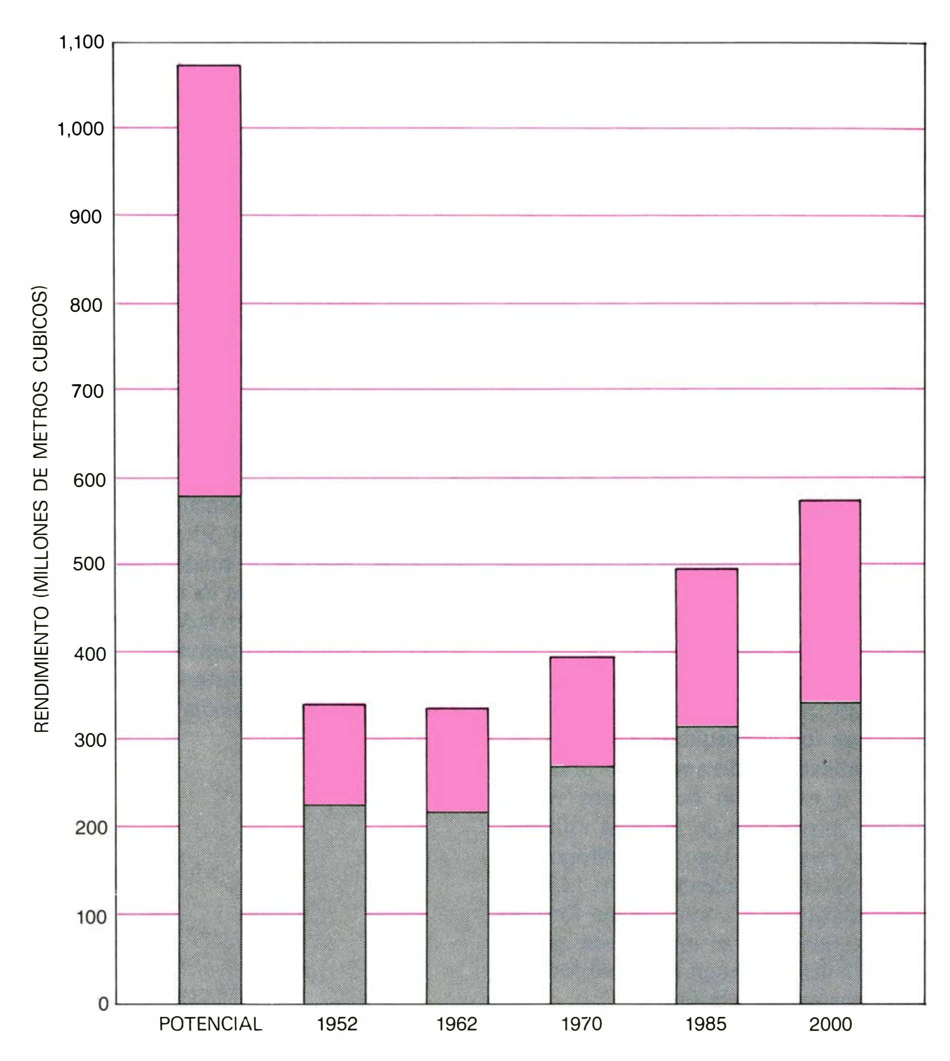


EL EFECTO DE LA SILVICULTURA INTENSIVA es evidente en estas secciones transversales de dos tsugas occidentales *(Tsuga heterophylla).* Los árboles tenían unos 20 años en el momento de la corta. Durante todo este tiempo, a excepción de los tres años últimos, no recibieron ningún cuidado; después, la plantación se sometió a entresaca y se aplicó fertilizante (urea) a mano. El aumento rápido de crecimiento resultante se aprecia en los tres anillos exteriores. Los árboles crecieron en un bosque natural. La muesca en la sección transversal de la derecha se debe a una rama que crecía allí.

ponderosa) ocupan las laderas más bajas y secas, mientras que otros pinos *(P. contorta)* se encuentran en alturas más frías y húmedas, y el abeto de Douglas, el abeto de Engelmann *(Picea engelmanni)* y el abeto verdadero forman el bosque continuo más elevado. En las Montañas Rocosas septentrionales, cerca de la frontera canadiense, son importantes localmente el pino blanco occidental *(P. monticola)* y el alerce occidental *(Larix occidentalis).* En el sudoeste, el pino piñón *(Pinus edulis)* y el enebro *(Juniperus)* constituyen bosques de chaparral a poca altitud y muy extendidos entre la región de *Pinus ponderosa* y el desierto.

En el este se encuentra, por todas partes, el bosque caducifolio mixto (caracterizado por robles y nogales americanos –*Carya*– mezclados con otros árboles de hoja ancha), excepto en la hilera septentrional de estados, donde los arces, las hayas y los abedules *(Betula)* constituyen el bosque caducifolio septentrional. En las zonas arenosas y rocosas, más secas, viven bien los pinos, en especial en el ancho cinturón de la llanura costera y en la región de Piedmont, que se extiende desde Virginia a Texas, donde los pinos *(Pinus taeda, P. echinata, P. elliottii* y *P. palustris)* constituyen el pinar meridional, el bosque más importante del este desde el punto de vista económico. En los estados septentrionales tienen importancia local otros pinos *(P. strobus, P. resinosa* y *P. banksiana).* lo mismo ocurre en los estados de los Grandes Lagos y en el norte de Nueva Inglaterra, con especies que se extienden desde el bosque boreal canadiense: las piceas, los abetos, los álamos *(Populus)* y los abedules. En el sudeste, son característicos los bosques de las tierras bajas formados por eucaliptos *(Eucalyptus),* el ciprés calvo *(Taxodium distichum)* y robles.

La experiencia de la gente que vive en países industrializados no induce a pensar que cerca de la mitad de la madera que se tala en el mundo se consuma como combustible, pero así es. De la producción total de madera de algo más de 200 millones de metros cúbicos por año, 990 millones se utilizan como combustible; el resto es para usos industriales. En la actualidad la madera sirve como cumbustible, sobre todo en los países menos industrializados, donde se quema directamente. Hay grandes probabilidades de que los países industrializados vuelvan a hacer un uso creciente de la madera como combustible, pero no ya quemándola directamente, sino aprovechando más la corteza y los subproductos industriales, y convirtiendo la madera o los residuos de ésta en metanol, gas y carbón vegetal.



PRODUCCION FORESTAL estadounidense obtenida en 1952, 1962 y 1970 y la que el U.S. Forest Service prevé para los años 1985 y 2000, comparada con el crecimiento potencial, qué es lo que ocurriría si todas las tierras forestales comerciales estuvieran completamente cubiertas de árboles y los bosques se gestionaran mediante técnicas silviculturales extensivas, tales como la recolección y entresaca sistemáticas. Los datos aducidos corresponden a las coníferas (*gris*) y a los caducifolios (*color*).

Gestión de los bosques

En la industria, la madera sirve no sólo como materia prima de productos estructurales (tablones, madera terciada, tableros contrachapados, aglomerados, tableros de fibras y aislantes) y de fibra (la base del papel, del cartón y de otros muchos productos de pulpa), sino también como fuente de materiales destilables (aceites, taninos, pertrechos navales y medicamentos) y de productos químicos (azúcares, alcoholes y fenoles). En los Estados Unidos, alrededor del 63 por ciento de los 226 millones de toneladas métricas de madera en bruto procesadas anualmente por las industrias de productos forestales, se emplea en materiales estructurales primarios, y el 35 por ciento en productos a base de fibras. El Forest Service ha previsto que la demanda en el año 2000 será el doble de lo que fue en 1970, y que cerca de la mitad de la misma servirá para productos estructurales y el 46 por ciento para productos a base de fibras.

Todos los bosques están afectados, en mayor o menor grado, por la acción del hombre. En el sentido más general, tal incidencia puede denominarse gestión de los bosques. Incluso en las zonas protegidas de los parques nacionales de los Estados Unidos, donde la tala, la construcción de carreteras y la utilización de vehículos a motor están prohibidos por la ley, la actividad humana afecta de varias maneras al bosque. La quema global de combustibles fósiles aumenta la cantidad de anhídrido carbónico en el aire. La gente introduce en la región plantas y animales exóticos y altera el equilibrio de la naturaleza al matar a los depredadores. Incluso la inactividad puede influir sobre el bosque, como cuando se toma la decisión de no combatir un determinado incendio forestal o de no ocuparse de una determinada epi-

demia causada por insectos o por enfermedad.

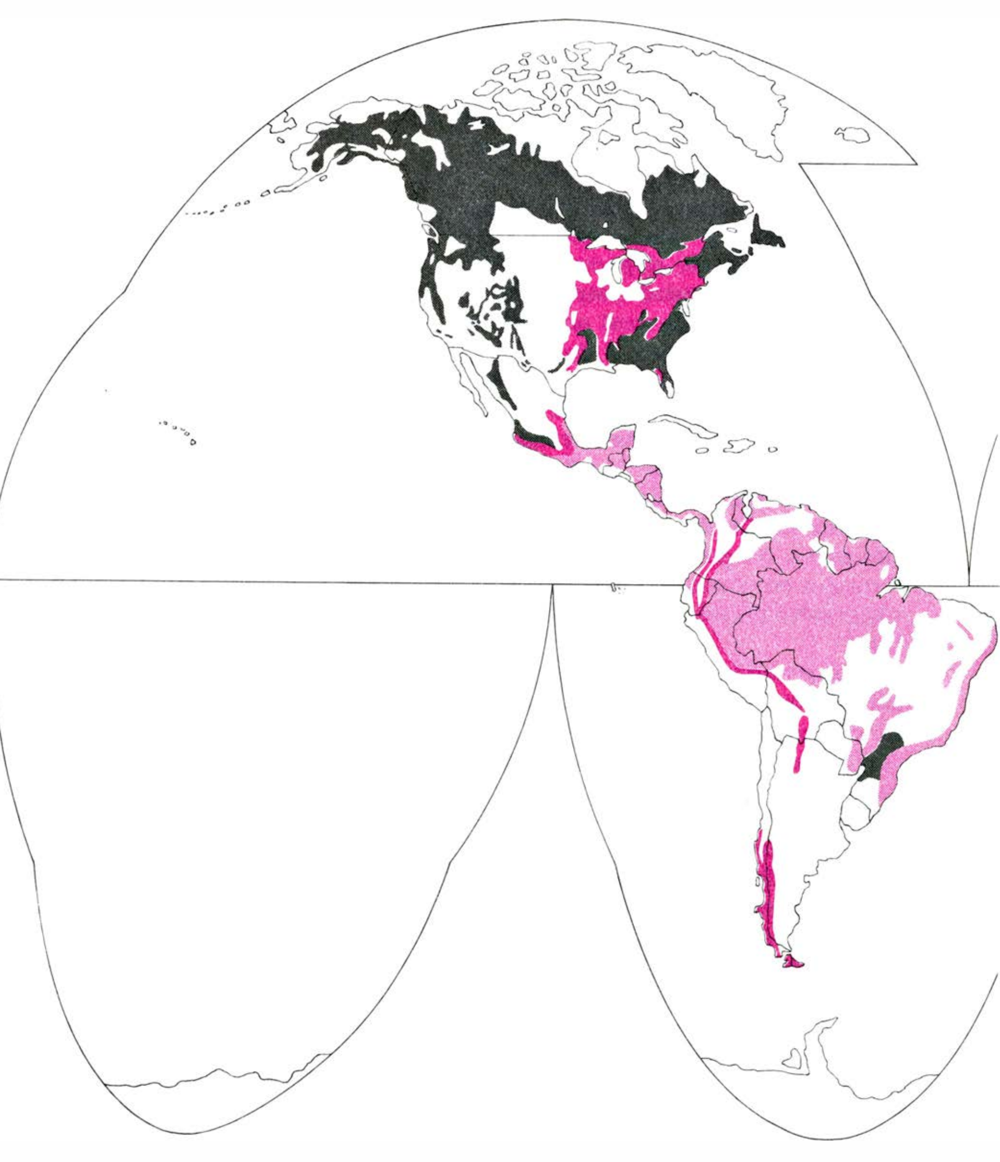
Hasta 1950, aproximadamente, la historia del bosque norteamericano era ante todo una historia de explotación, es decir, el bosque se había tratado como un recurso no renovable. El indio americano utilizaba el fuego para conducir la caza al alcance del arco y la flecha. El colono europeo dependía del bosque para obtener combustible y maderos, pero al mismo tiempo taló gran parte de la región oriental de los Estados Unidos para conseguir tierras de labor. La tierra yerma o demasiado pendiente y rocosa para las labores agrícolas fue repetidamente desbrozada para obtener madera y combustible para caldear las casas, fundir hierro y alimentar las locomotoras. Sólo cuando se abrieron los yacimientos de carbón de los Apalaches, éste sustituyó a la madera como fuente básica de energía. Sin embargo, para entonces ya quedaba muy poco en el este de lo que fue el bosque precolonial. En la actualidad, ha desaparecido prácticamente, a excepción de algunos restos que son protegidos en parques estatales y otras reservas. Unos 6 millones de hectáreas (el 5 por ciento) de los 145 millones clasificados como tierras forestales comerciales en el este (al este de las Great Plains) no tienen densidad forestal para considerarlas bosques.

Cuando se abrió la expansión hacia el oeste, a principios del siglo XIX, se abandonaron muchas explotaciones agrícolas del este. Los campos y los pastos sin utilizar permitieron el desarrollo de pinos y otras especies arbóreas pioneras, que produjeron un bosque secundario que alcanzó el tamaño comercial a principios de este siglo. Cuando se talaron las coníferas, éstas fueron sustituidas por los caducifolios que habían crecido bajo ellas. Al pasar el tiempo, los caducifolios que toleran la sombra desplazaron gradualmente a las especies menos tolerantes, cambiando así de forma continua la composición del bosque. Distintas variaciones de esta sucesión en un campo abandonado se han producido como consecuencia de infinitas combinaciones de clima, lugar y de la historia forestal de incendios, vientos, talas y años de sementera (las épocas intermitentes, por lo general cada tres, cuatro o cinco años, en las que determinada especie residente de árbol produce una gran cantidad de semillas). Como resultado de estas fuerzas ecológicas, incluyendo la actividad y la inactividad humanas, el actual bosque oriental estadounidense es muy distinto del bosque precolonial. Por las mismas razones, será asimismo muy distinto dentro de algunas décadas.

En el oeste, la tala de los bosques primarios precoloniales ha sido rápida. El madereo extensivo empezó en las tierras privadas (por lo general las más bajas, llanas y productivas) hacia 1900, y en los bosques nacionales, que cubren la mayor parte de las montañas, después de la Segunda Guerra Mundial. En la actualidad, poco queda del antiguo bosque primario en tierras privadas. La mayor parte del bosque secundario situado en tierras que pertenecen a compañías madereras y papeleras se ha empezado a gestionar.

En los bosques nacionales del oeste, que constituyen el 55 por ciento de las tierras forestales comerciales, al oeste de las Great Plains, y el 50 por ciento de todas las reservas de madera de aserrar de la nación, los restos de bosque secundario están entremezclados con otras zonas que han sido quemadas o desbrozadas y repobladas posteriormente. Los bosques de edad media son menos abundantes, pues su tala se hizo antes de la Segunda Guerra Mundial; deben su existencia sobre todo a incendios que tuvieron lugar a principios de siglo. En los bosques nacionales de pino ponderosa del interior, la tendencia es maderar los árboles de forma bastante selectiva, pues esta especie crece en tierra relativamente seca que sólo sostiene gramíneas o artemisas si se desbroza el bosque. En los bosques nacionales de abeto de Douglas y otras especies asociadas, de crecimiento rápido, situados al oeste de las cumbres de las Cascades y de Sierra Nevada, la práctica usual consiste básicamente en aclarar mediante tala 16 hectáreas o más en un tranzón. Unos 2,5 millones de hectáreas (el 5 por cien), de los 52 millones que en el oeste están clasificadas como bosque maderero comercial, no tienen unas reservas significativas de árboles.

Hasta el siglo XVIII la silvicultura era rudimentaria y raramente se practicaba.



RECURSOS FORESTALES DEL MUNDO, recogidos en este mapa. Las regiones en las que predominan las coníferas como los pinos, las piceas, las tsugas, los abetos, las secoyas y los cedros se indican

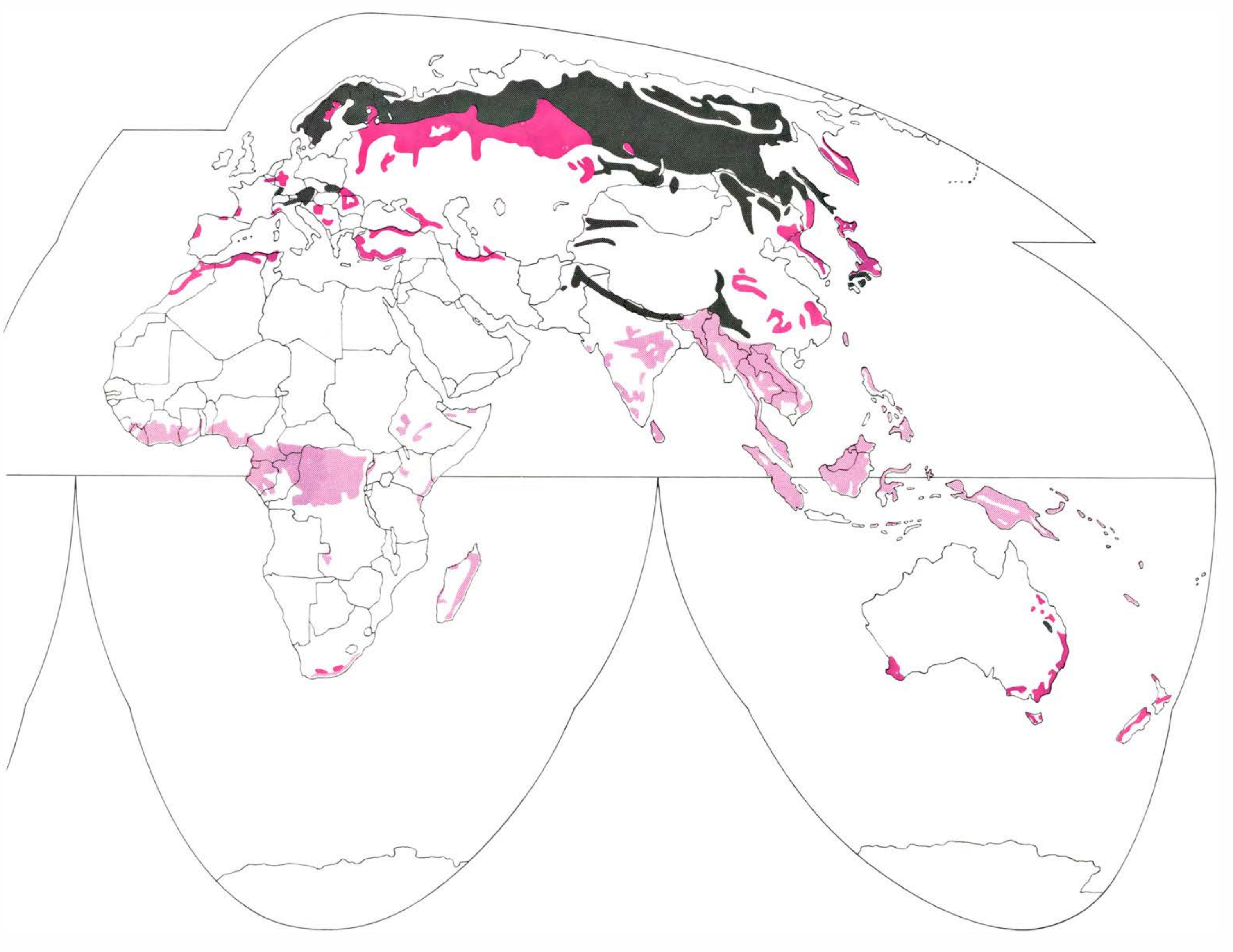
Los guardabosques de Europa occidental durante la Edad Media eran, sobre todo, guardas de caza que recorrían las reservas de caza para los señores feudales. Los árboles se trataban como un recurso natural fácilmente disponible, que se podía explotar sin preocuparse demasiado de su sustitución. La explotación sigue siendo la norma en buena parte del globo, en particular en los trópicos y en los bosques boreales.

Estrategias de silvicultura

En el siglo XVIII, la necesidad de madera para combustibles y para la construcción en Europa occidental dio origen a las prácticas de silvicultura destinadas a la reforestación de las zonas taladas y a la gestión de los bosques con vistas a la producción continuada de madera y otros bienes. Este enfoque, que hoy todavía se sigue ampliamente, se denomina silvicultura convencional extensiva. Se basa en sistemas de corta de bosques maduros que favorezcan la regeneración natural. La técnica incluye asimismo la entresaca de los árboles crecidos para permitir el aumento de diámetro de los demás árboles, que se talarán posteriormente.

Durante el mismo período, muchos de los bosques caducifolios (de árboles de madera dura) de Europa occidental se convirtieron en bosques de coníferas (de madera blanda) debido a las cortas de los bosques existentes y a la repoblación de bosques puros de pino albar *(Pynus sylvestris)* y de abeto rojo *(Picea abies)*. La mayoría de estas conversiones tuvieron éxito, de modo que en buena parte del mundo desarrollado fueron comunes los bosques replantados, más o menos puros, de especies arbóreas con valor comercial. Esta técnica, que puede denominarse silvicultura convencional intensiva, está muy desarrollada en los bosques de abeto de Douglas del noroeste del Pacífico y en la región meridional de los pinares, en los Estados Unidos, y en las plantaciones de pinos de Europa occidental, Sudáfrica, Nueva Zelanda, Australia y Chile. Se trata de un verdadero cultivo de árboles.

A mediados del siglo XIX, en las plantaciones de Alemania, Suiza y Francia crecía la segunda y tercera generación de coníferas. Los guardabosques profesionales (por entonces formados en los centros forestales de las universidades) empezaron a darse cuenta de que los rendimientos solían ser menores que en la primera cosecha, en particular en el caso de piceas crecidas lejos de su hábitat normal. Los forestales atribuyeron esta mengua a la formación de suelos ácidos en los bosques compuestos únicamente por piceas o pinos. (Las agujas de estos árboles tienen un bajo contenido en nutrientes y al caer en el suelo forman un humus bruto que es bastante ácido.)



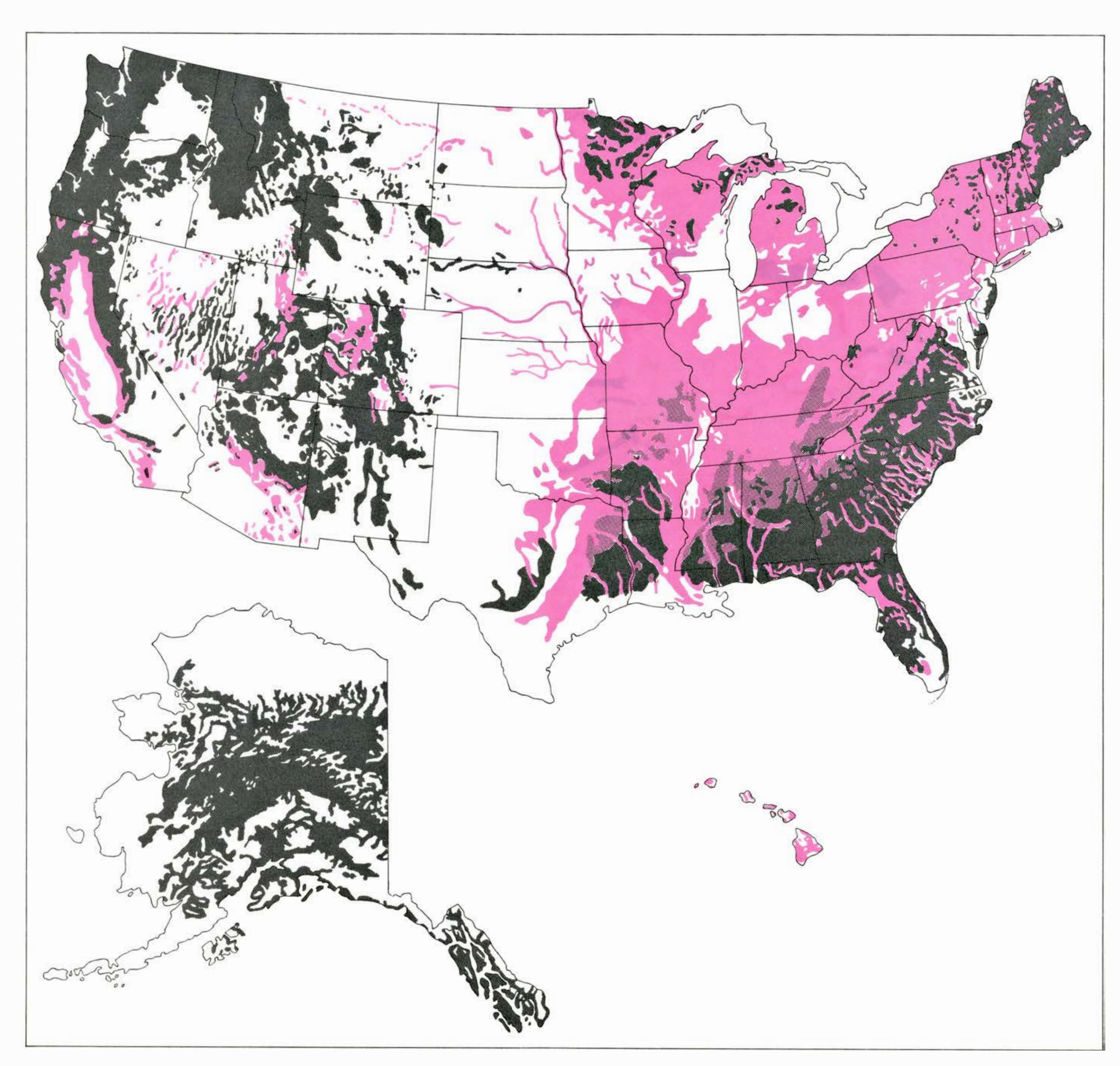
en gris; las zonas de color obscuro indican las regiones en las que predominan los caducifolios templados, como los robles, los nogales americanos, los arces, los álamos y los nogales, y las zonas de color claro corresponden a las regiones en las que predominan especies de caducifolios tropicales.

Estos forestales desarrollaron otra idea de la silvicultura. Podríamos bautizarla "enfoque naturalista". En él se presta atención a la adaptación de los árboles a la ecología del lugar. Este concepto también exige el mantenimiento de tipos distintos de árboles en bosques mixtos, incluidos los caducifolios, pues las hojas que caen de éstos atraen a los organismos que contribuyen a la formación del suelo, y así ayudan a mantener la fertilidad del mismo.

Finalmente, durante la última década, el creciente interés en la utilización de materiales vegetales como fuente de energía y de materias primas químicas ha sido motivo de debates y ha llevado a hacer algunos experimentos en aplicación de la idea de la silvicultura de rotación corta. De acuerdo con ella, los árboles que crecen rápidamente se cosechan con relativa frecuencia, frecuencia que llega a ser bianual.

El lector que haya contado las estrategias silviculturales que acabo de enumerar se dará cuenta de que he nombrado cinco: de explotación, convencional extensiva, convencional intensiva, naturalista y de rotación corta. Existen, asimismo, varios enfoques intermedios. Cada una de esas cinco estrategias básicas deja abiertas varias cuestiones fundamentales.

Por ejemplo, puede aducirse que el método de explotación no es realmente silvicultura, puesto que supone únicamente la tala de los árboles sin preocuparse de la regeneración del bosque. Pero se trata de una forma de gestión forestal. Desde el punto de vista de maximizar las ganancias económicas que obtiene el dueño de los árboles, este tipo de cosecha puede estar justificada en razón de que el coste de restablecer el bosque puede ser mayor que la ganancia prevista para la nueva plantación de árboles. (Los bosques nacionales de los Estados Unidos se administran según un mandato del Congreso por el cual deben ser gestionados para que produzcan un rendimiento estable: en ellos, por tanto,



PRINCIPALES TIPOS DE BOSQUE en los Estados Unidos, esquematizados en esta ilustración, según predominen las coníferas *(gris)*, que son árboles de madera blanda, los árboles caducifolios de hojas anchas *(color)*, que son árboles de madera dura, o los bosques mixtos de árboles de madera blanda y árboles de madera dura *(color y gris)*. Las regiones que aparecen en blanco no albergaron nunca bosques o lo fueron antaño, pero ahora no.

el método de explotación es ilegal, sin considerar sus méritos económicos.)

Cuando se trata de una política de explotación, la cosecha de árboles se denomina corta comercial si se retira la mayor parte del arbolado, y corta selectiva o por entresaca si sólo se talan los árboles más valiosos y se deja un número importante de los de menos valor. Este número dependerá de la edad y de la estructura del bosque, así como de consideraciones económicas. Muchos de los árboles que se dejan, caerán ante la fuerza del viento o el peso del hielo y la nieve una vez se les haya privado del soporte que prestaban los árboles talados, y se hallen expuestos a los elementos.

Las desventajas del método de explotación son bien conocidos y se señalan con frecuencia. En primer lugar, una tala comercial grande es una fea herida en el paisaje, que permanece por lo menos durante varios años. En segundo lugar, el desbroce negligente del terreno para abrir carreteras que atraviesen la zona y el empleo indiscriminado de equipo de tala pesado puede producir una erosión grave. Tercero, puede desperdiciarse mucha madera al destruir árboles que han estado creciendo durante años, pero que no han alcanzado el tamaño comercial. Cuarto, el impacto sobre la vida animal y vegetal, la reserva de agua, los valores recreativos y otros suele ser muy grave. Por último, la regeneración del bosque se deja al azar y ésta puede o no tener lugar.

Un bosque explotado puede dejarse tal como está en la esperanza de que los árboles supervivientes se vean suplementados por regeneración natural, de modo que con el tiempo se desarrolle un bosque secundario más o menos completo. Sin embargo, en la mayoría de los casos se optará por nivelar con grandes máquinas los tristes despojos o rociarlos con herbicidas, quemar el lugar para reducir los restos orgánicos a cenizas de madera y replantar la zona con plantones de coníferas, suficientemente grandes y robustos para formar un nuevo bosque.

Silvicultura convencional

Hay dos prácticas principales que servirán de ejemplo de la silvicultura convencional extensiva, tal como ha evolucionado durante los dos últimos siglos desde sus comienzos en Europa occidental. Una es la recolección de árboles maduros mediante sistemas silviculturales, que son métodos de tala destinados a asegurar la regeneración de los árboles en las zonas de corta. La otra es la técnica de corta por entresaca y de cortas adicionales, con el fin de liberar a los futuros árboles que hay que recolectar de una competencia indeseable.

El principal objetivo de la silvicultura convencional extensiva estriba en mantener un rendimiento constante de madera. Siguiendo esta estrategia, se deja crecer los árboles hasta que sus troncos son suficientemente grandes para ser aserrados. En los bosques nacionales de los Estados Unidos, y de acuerdo con la normativa emanada del Congreso, la edad de rotación se establece como aquella que corresponde a la culminación del incremento anual medio, es decir, la edad a la que los árboles del bosque producen su crecimiento acumulativo medio máximo. En la práctica, este sistema significa que los árboles crecen hasta tamaños superiores en las tierras públicas que en las privadas, en las que las presiones económicas suelen favorecer una recolección más temprana. La edad de rotación para la mayoría de especies arbóreas comerciales en los Estados Unidos tiende a situarse entre 40 años (madera para pasta recolectada en tierras privadas) y 100 años (troncos cortados con destino a la construcción en los bosques nacionales).

Los sistemas de silvicultura que se emplean para recolectar árboles maduros pueden agruparse en cuatro categorías. Una de ellas es el sistema de selección, que consiste en talas parciales reducidas, que se repiten cada pocos años para crear un bosque de árboles de edades distintas. La técnica vale sólo para las relativamente pocas especies comerciales que pueden medrar durante la mayor parte de su vida en un ambiente umbrío.

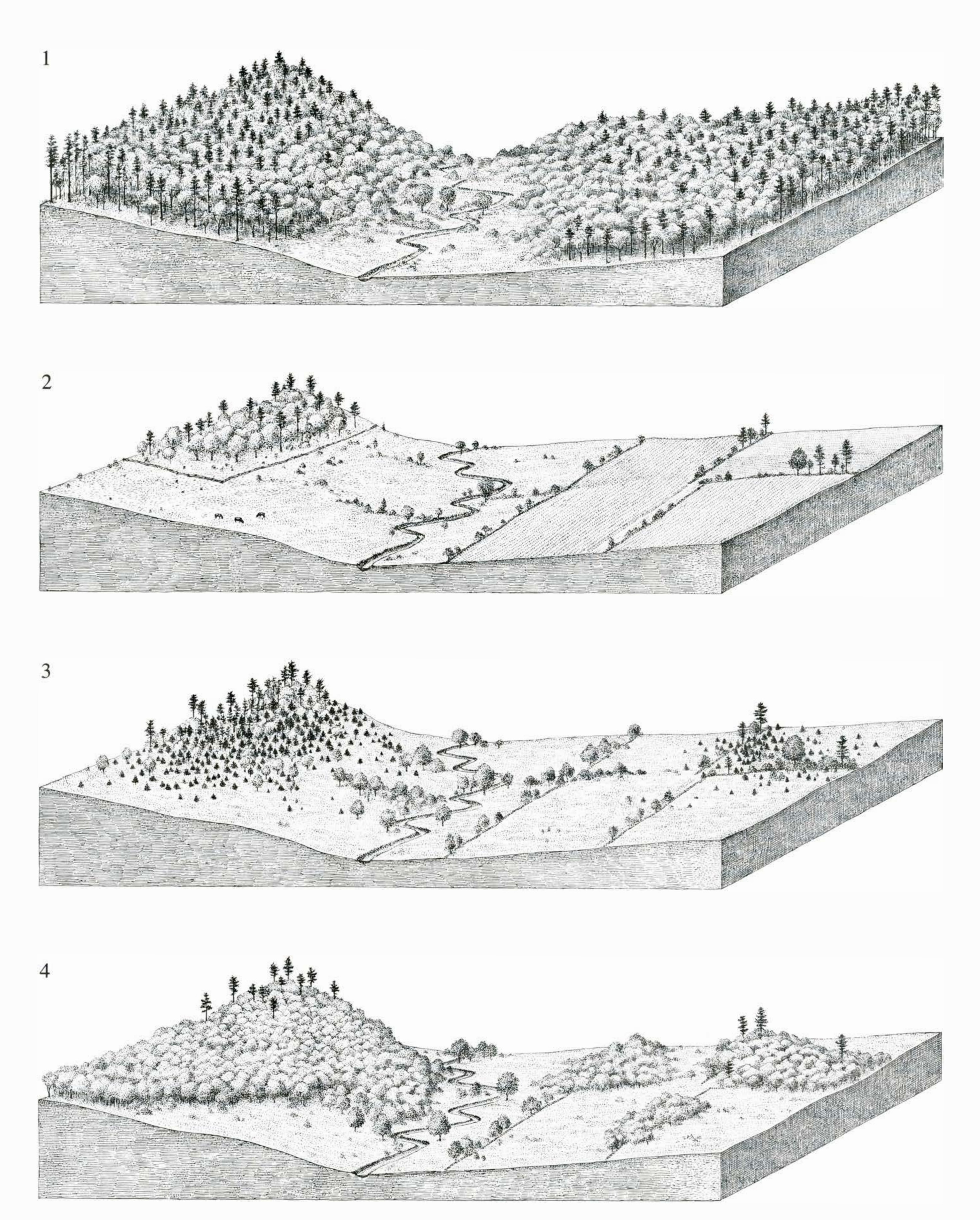
La mayor parte de las especies de árboles comerciales viven mejor a pleno sol, y deben crecer en plantaciones de la misma edad. Los tres sistemas de silvicultura restantes están destinados a la creación de dichas plantaciones. Uno es la corta o tala, con o sin la plantación o siembra subsiguientes, pero, por lo menos, pensando en la regeneración natural y cuidando de minimizar los efectos perjudiciales de la cosecha. La segunda técnica deja incólumes algunos árboles padres; no se emplea mucho porque es probable que los árboles privilegiados sean abatidos por el viento o el hielo, puedan no producir semillas suficientes para restablecer el bosque y sean tan pocos que no valga la pena volver más tarde y recolectarlos. El último sistema es el denominado de corta con árboles de protección, porque el bosque maduro se extrae en dos o más talas parciales, de modo que la nueva plantación pueda establecerse al abrigo de una bóveda parcial de árboles intactos.

En cuanto a la entresaca, suele realizarse en bosques cuyos árboles tienen ya un tamaño grande. Puede cortarse del 25 al 40 por ciento de la plantación, en parte para recolectar pronto los árboles que parece probable que mueran, y en parte para aumentar el diámetro definitivo de los árboles restantes. Con excepción de unas pocas especies que tienden a estancarse en condiciones de hacinamiento, la entresaca no produce normalmente rendimientos superiores por unidad de superficie, pero mejora el crecimiento de los árboles mayores y más valiosos. Una entresaca comercial es económica cuando los árboles que se extraen pueden venderse para pasta de papel, como combustible y otros usos para los cuales es apropiada la madera de pequeñas dimensiones.

La silvicultura convencional extensiva se practica ampliamente en Europa occidental, Estados Unidos y muchas otras regiones templadas. Puesto que la mayoría de las operaciones de silvicultura que se realizan bajo esta denominación cubren gastos con los productos de madera extraídos, no se requiere ninguna inversión importante de capital. El coste principal redunda en beneficios sin riesgo.

Por otra parte, estas operaciones pueden ser insuficientes para mantener un rendimiento continuo. La regeneración natural puede fracasar, de manera que el lugar tenga que plantarse o sembrarse. Puede que haya que liberar a los árboles jóvenes de las especies deseadas de la competencia con especies indeseables. Quizá se necesiten otras inversiones para conseguir un bosque completamente comercial y un crecimiento máximo. De esta manera, la silvicultura se hace más intensiva.

El crecimiento y el rendimiento de los árboles puede incrementarse de una manera considerable mediante la aplicación de técnicas de silvicultura intensiva. Aún así, y puesto que se requieren décadas para hacer crecer una plantación de árboles, los incentivos económicos para aplicar las técnicas pueden no resultar tentadores. De hecho, la inversión realizada para establecer una plantación o para aumentar su crecimiento puede exceder del valor de la cosecha final. Sin embargo, la silvicultura intensiva, que supone la inversión de considerables cantidades de capital en el bosque, resulta cada vez más viable y se practica cada vez más, en particular por parte de los terratenientes industriales que buscan un suministro continuo de madera para sus aserraderos, sus industrias pa-



SUCESION DE UN CAMPO ABANDONADO. Indica lo que ocurre cuando un bosque no se gestiona en absoluto. La sucesión se esquematiza aquí para un lugar típico de Nueva Inglaterra, y empieza *(1)* con el bosque mixto de coníferas y caducifolios que existía cuando llegaron los colonos. Gradualmente, éstos cortaron casi todos los árboles, primero para obtener combustible y materiales de construcción, pero después para desbrozar la tierra con fines agrícolas *(2)*. Cuando se abrió el oeste norteamericano, se abandonaron muchas explotaciones agrícolas orientales; por regeneración natural se desarrolló un bosque secundario formado principalmente por pinos y cedros, e incluia algunas especies de caducifolios *(3)*. Cuando las coníferas se recolectaron *(4)*, los caducifolios predominaron. En el estadio actual, los caducifolios que toleran la sombra están desplazando a las especies menos tolerantes, dando así origen a un bosque clímax de roble-nogal americano que será muy distinto del bosque precolonial. (Tom Prentiss.)

peleras y sus fábricas de derivados de la madera.

En la silvicultura intensiva, el propietario emplea por lo menos una, y probablemente varias, de las técnicas siguientes: (1) Se trabaja en un lugar talado para preparar la tierra a repoblar o para crear las condiciones de la superficie favorables para la regeneración natural del bosque. (2) Los bosques formados por especies que crecen lentamente o de menos valor que otras que pueden crecer en aquel lugar se limpian mediante talas, y se plantan especies más idóneas o de un crecimiento más rápido. (3) Se plantan aquellas variedades que han demostrado una mejora en sus características genéticas. (4) Se emplean herbicidas para reducir la competencia indeseable, sobre todo por parte de caducifolios de valor comercial limitado. (5) La plantación se somete a entresacas antes de la madurez, para evitar el estancamiento y estimular el crecimiento de los árboles potencialmente comerciales. (6) Se aplica fertilizante a la plantación, para compensar las deficiencias en nitrógeno y en fósforo. (7) Se aplican plaguicidas adecuados, para reducir las graves amenazas que representan insectos y hongos.

Considérese el potencial de sólo uno de estos tratamientos. El Forest Service estima que pueden conseguirse ganancias en el rendimiento, del orden del 8 al 15 por ciento, en una generación mediante la selección genética del abeto de Douglas en Oregón occidental y en Washington. En los mejores lugares, el rendimiento podría duplicarse en la tercera generación. Hoy se consiguen beneficios del 10 al 20 por ciento en volumen y en calidad en la primera generación a través de la mejora genética de pinos meridionales *(Pinus palustris)*.

Otras técnicas

El método naturalista en silvicultura está ejemplificado por los hábitos forestales de Suiza. Apartándose del concepto de bosques monoespecíficos de la misma edad y de los métodos de cultivo violentos, los suizos han confiado cada vez más en los tipos de árboles naturales y en las tendencias naturales de la sucesión como base para su silvicultura. El bosque mixto con árboles de edades diferentes se ha convertido en el ideal.

Los principales argumentos a favor de esta técnica son: el escaso capital necesario y los pocos riesgos que comporta. Una vez establecido un bosque según las líneas naturales, se mantiene por cortas parciales y reducidas periódicas destinadas a producir la mayor ganancia económica compatible con el mantenimiento de un bosque mixto, continuo y de edad desigual. El suelo no se deteriora, y el establecimiento generalmente rápido de especies aceptables reduce a un mínimo las inversiones en silvicultura. Un bosque natural es menos susceptible al ataque de enfermedades y de insectos que una plantación monoespecífica.

Ciertamente, un bosque de este tipo puede resultar productivo y provechoso para algunas especies arbóreas en algunos lugares. Es igualmente cierto que puede hacerse crecer un bosque con árboles de la misma especie y de igual edad, y que con frecuencia produce mayor biomasa y mayores beneficios económicos que el bosque gestionado de forma natural. No se puede, pues, generalizar. Tanto la silvicultura naturalista como la silvicultura convencional tienen un hueco en la gestión forestal. Qué hacer crecer y cómo hacerlo crecer son decisiones que deben tomarse para cada lugar en particular, según las condiciones del clima y del suelo que existan allí.

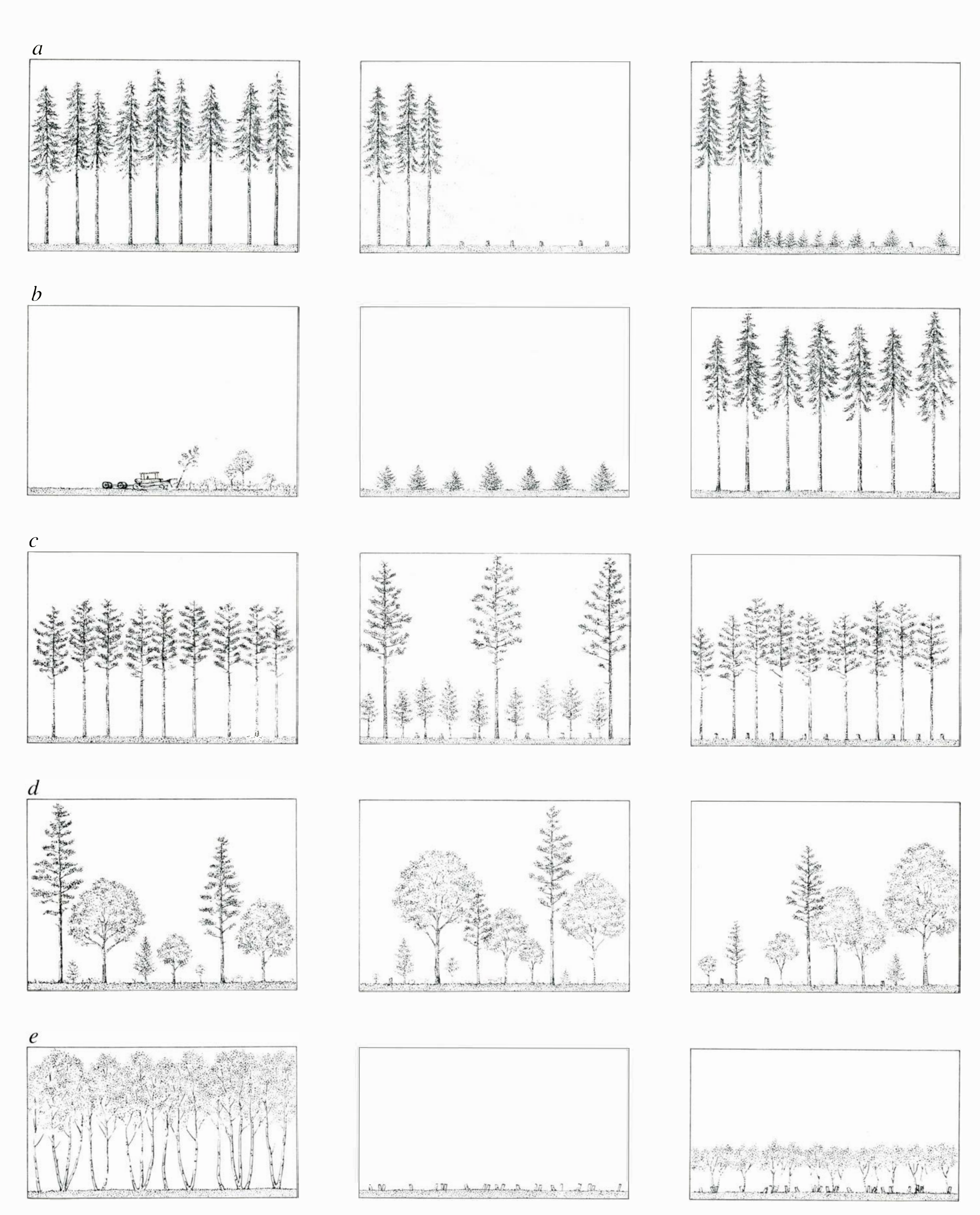
El método de silvicultura por rotación corta consiste en producir grandes cantidades de material arbóreo mediante la selección de fotosintetizadores muy eficientes y en hacerlos crecer con un sistema de cultivo intensivo, con recolecciones frecuentes. La idea de desarrollar "plantaciones de biomasa" es, en esencia, un retorno a una forma del sistema de sotos que se empleó extensamente en Europa y en los Estados Unidos orientales durante el siglo XIX, para producir combustible a partir de bosquecillos de caducifolios que se recolectaban en rotaciones cortas y regeneraban mediante brotes a partir de vástagos. En su manifestación actual, la estrategia consiste en basarse en especies de crecimiento rápido, como chopos americanos *(Populus deltoides)*, falsos plátanos *(Acer pseudoplatanus)*, alisos *(Alnus)* y álamos temblones *(Populus tremula)*; cortar mecánicamente los bosquecillos, en sistemas de rotación de dos a cuatro años (cuando los árboles tienen de 3 a 6 metros de altura y de 2,5 a 5 centímetros de diámetro y pueden ser convertidos en astillas para quemar o para obtener productos químicos); confiar la reproducción a los brotes de los vástagos que quedan (o a los chupones del álamo temblón), y cultivar y fertilizar intensivamente los brotes. Se han hecho predicciones de varias decenas de toneladas de peso seco de materia vegetal por hectárea y por año, en base al potencial fisiológico de los árboles y a estudios en pequeñas parcelas.

Si se alcanzara realmente esta producción en amplias zonas, sin grandes inversiones de energía en fertilización, irrigación, cultivo y recolección, la silvicultura de rotación corta tendría un futuro prometedor. Desgraciadamente, todavía no se han podido obtener caducifolios en plantaciones con un éxito notable, y todavía menos hacerlos crecer al ritmo que se consigue en experiencias con variedades genéticamente superiores, bajo cuidados intensivos en el vivero o en otras condiciones cuidadosamente controladas. Ello no quiere decir que haya fallado el trabajo experimental, sino que no ha sido posible transferir los resultados a operaciones de alcance comercial.

El porvenir de la silvicultura

Los bosques poseen un considerable potencial para producir energía y materias primas. Por ejemplo, si el valor energético de la madera se considera que es de 7500 Btu (unidades térmicas británicas) por libra [una unidad térmica británica por libra equivale a 2,32 kilojoule por kilogramo] la producción primaria neta anual de los bosques del mundo es de aproximadamente 1200 quad (un quad es un trillón de Btu), o cinco veces 230 quads de energía, que fue la utilizada en todo el mundo en 1975. Robert L. Burgess, del Oak Ridge National Laboratory, ha estimado (sobre la base de que el crecimiento anual sobre el suelo de los bosques del mundo es de 13.000 millones de toneladas métricas, de los cuales la mitad son económicamente accesibles) que podría producirse un millón de megawatt de electricidad a partir de madera y sobre una base de rendimiento estable; esto significa el doble de la actual capacidad generadora de energía en los Estados Unidos.

En 1970 la tasa de crecimiento anual de los bosques comerciales en los Estados Unidos se estimó en 2,7 metros cúbicos por hectárea. Si todas las zonas forestales comerciales estuvieran completamente plantadas con árboles y equilibradas en clases de edad, el crecimiento potencial habría sido de 5,2 metros cúbicos por hectárea y por año. La productividad biológica de las zonas de bosques comerciales de los Estados Unidos es tal que el crecimiento neto realizable de los bosques podría duplicarse en medio siglo a través de la aplicación generalizada de prácticas de silvicultura comprobadas. Con una amplia aplicación de la silvicultura intensiva, incluyendo el uso completo de especies de caducifolios y el aprovechamiento de todo el árbol en cada especie recolectada, la productividad potencial de los bosques en los Estados Unidos se acercaría a tres veces el nivel actual.



ESTRATEGIAS DE LA SILVICULTURA. En la tala con regeneración natural *(a)*, se corta completamente un bosque en una zona determinada (tranzón). La regeneración del bosque puede tener lugar mediante la caída natural de las semillas de los árboles que quedan intactos cerca del área talada. En la tala con replantación *(b)*, puede prepararse un lugar desbrozado para plantar plantones genéticamente mejorados, que crecen dando un bosquecillo uniespecífico de edad uniforme. El bosque, sometido a entresacas a intervalos, se trata con fuego, fertilizantes, herbicidas o plaguicidas, según se requiera. En el sistema de corta con árboles de protección *(c)*, se tala una parte del bosque de manera que en la misma queden árboles que proporcionen semillas y resguardo durante cierto período de años, al objeto de asegurar la regeneración. Una vez establecida la nueva generación, se extraen los árboles padres para dejar una plantación de edad uniforme. El sistema de selección *(d)* se basa en el mantenimiento de un bosque mixto de árboles de edades desiguales que son más o menos tolerantes a la sombra. En el método de rotación corta propuesto, llamado sistema de setos *(e)*, los árboles que crecen rápidamente y se regeneran por brotes serían cultivados de forma intensiva y recolectados mediante maquinaria adecuada, siguiendo rotaciones cortas de hasta dos años. Los árboles recolectados serían convertidos luego en astillas y destinados a combustible o a materias primas.

¿Cuáles son las posibilidades que tiene la investigación de perfeccionar las prácticas demostradas de silvicultura? En los Estados Unidos, la investigación en silvicultura y en aspectos relacionados de la ciencia forestal ha corrido paralela a la labor realizada en el campo de la agricultura. Viene cumplida por el Forest Service a través de 82 laboratorios, investigadores dispersos en unas 60 universidades (en la mayoría de los casos con fondos federales) y por un número limitado de industrias que utilizan la madera. El actual nivel de actividad es de unos 400 científicos-año dedicados anualmente a investigaciones relacionadas con la biología, el cultivo y la gestión de los bosques, con la genética y la reproducción de los árboles forestales y con la economía de la producción maderera. Durante más de 50 años, amplios estudios de laboratorio y de campo han tratado de los requerimientos ecológicos y fisiológicos de las principales especies de árboles. Se ha alcanzado el punto en el que los silvicultores comprenden las interacciones de estos árboles con su ambiente, sin descontar la acción de los principales insectos y las enfermedades que forman parte del ecosistema de bosque.

Pueden citarse varios logros. Dos de ellos se han descrito aquí: la mejora genética de los pinos meridionales y el flujo de nutrientes, agua y otros componentes de un ecosistema de bosque en cuencas forestadas o taladas controladas. Se ha realizado asimismo una labor útil sobre la física del aire y la atmósfera y el control de los rayos; sobre el análisis de fotografías aéreas y otras formas de sensores remotos como medio de obtener inventarios de grandes zonas forestales (incluso de los recursos forestales de toda la nación), y sobre el uso de modelos de propagación lineal para determinar y fijar el momento de la recolección de los árboles y de otras operaciones de la gestión forestal.

No se ha trabajado bastante, por otra parte, en varios problemas que se han convertido en los principales temas en las confrontaciones entre los ambientalistas (proteccionistas) y los encargados de la gestión forestal. ¿De qué manera los bosques de la misma edad y los de edad distinta (bosques formados por distintas especies de árboles y que crecen en sitios distintos) se equiparan en productividad y en pérdida de nutrientes? ¿De qué manera las plantaciones puras y mixtas se equiparan en estos aspectos y en su vulnerabilidad relativa a los insectos, las enfermedades y otros riesgos? Por desgracia, los Estados Unidos carecen de estudios de investigación definitivos que puedan tener una aplicación más amplia en la conformación de una política nacional sobre los bosques.

Solitones

Son ondas que no se dispersan ni se disipan, sino que mantienen su forma y tamaño indefinidamente. Se ha descubierto que los solitones pueden considerarse también partículas elementales de masa no nula

Claudio Rebbi

Las ondas y las partículas han estado íntimamente relacionadas en la física desde la formulación de la mecánica cuántica en la década de 1920. En los últimos años ha surgido una nueva conexión entre ellas. Procede de una fuente sorprendente: el análisis de ciertas ecuaciones de onda que no son parte de la mecánica cuántica sino que provienen de la física clásica. Las soluciones de estas ecuaciones describen ondas que no se extienden ni dispersan como todas las ondas usuales, sino que conservan su forma y tamaño indefinidamente. La onda puede considerarse como una cantidad de energía que está confinada permanentemente en una región del espacio. Puede ponerse en movimiento pero no disiparse extendiéndose. Cuando dos de tales ondas chocan, cada una sale de la colisión con su identidad intacta. Si una onda encuentra una "antionda", ambas pueden aniquilarse. Un comportamiento de esta clase resulta extraordinario en el campo de las ondas, pero es corriente en otro contexto. Dada una descripción de un objeto con estas propiedades, un físico diría que se trata de una partícula.

Desde hace tiempo, en hidrodinámica se conocen ondas que se propagan sin dispersarse, que reciben el nombre de ondas solitarias o solitones. Se ha descubierto recientemente que surgen asimismo ondas no disipativas de algunas de las ecuaciones formuladas para describir las partículas elementales. A estos objetos se les ha dado también el nombre de solitón. Los solitones de que trataré aquí son aquellos que tienen un mecanismo particular de confinamiento: su dispersión se evita por una restricción topológica. No pueden desintegrarse por expansión, por la misma razón por la cual un nudo hecho en una cuerda infinita no puede deshacerse sin cortar la cuerda.

Por ahora, los solitones de la física de partículas no son más que una creación de los teóricos y quizá no existan en la naturaleza. Por el contrario, si las ecuaciones que describen las partículas elementales se encuentran entre las que admiten soluciones en forma de solitones, entonces los solitones aparecerán como nuevas partículas. Serían muy pesadas, quizá miles de veces más pesadas que el protón. Una partícula de tipo solitón tendría también ciertas propiedades características; así, hay una teoría que predice que cada solitón sería un monopolo magnético, un polo magnético norte o sur aislado [véase "Monopolos", por Pedro Pascual y Rolf Tarrach: INVESTIGACION y CIENCIA, septiembre, 1978; páginas 4-13].

Aun cuando tales partículas no existieran, los solitones podrían surgir en el ámbito de la física de las partículas elementales con otro papel: como objetos confinados, no sólo en una región definida del espacio, sino también en un instante de tiempo. A estos solitones evanescentes se les ha llamado instantones. Como el solitón, el instantón es un objeto clásico con una interpretación mecánico-cuántica. No se le considera partícula, sino transición entre dos estados de un sistema, una manifestación del fenómeno conocido como efecto túnel. Ya se ha recurrido a las transiciones mediadas por instantones para explicar un esquema de masas de partículas que había constituido un problema persistente para los teóricos.

A fin de entender qué es lo que debe destacarse en una onda que no se dispersa, basta considerar una onda ordinaria, disipativa, tal como la que se genera cuando arrojamos una piedra a un estanque. Una tal onda viaja por la superficie del agua como un anillo que se ensancha. Si nos fijamos con atención observaremos que la perturbación se hace menos pronunciada cuando se aleja de la fuente, y con el tiempo desaparece completamente.

Un factor importante en la desintegración de las ondas del agua es la viscosidad del medio, que es un efecto del rozamiento. En algunos medios, sin embargo, las ondas se propagan sin rozamiento, y, a pesar de todo, se desintegran; e incluso las ondas de un estanque lleno de un fluido sin fricción desaparecerían. La razón de ello estriba en que las componentes de la onda que tienen longitudes de onda distintas se propagan con velocidades diferentes, dispersando la energía de la onda en un área mayor. Cuando se mira una sección de la onda, ésta aparece cada vez más ancha aunque de amplitud menor. Si se le deja continuar hasta el infinito, se dispersa en un área infinita y, por tanto, desaparece.

Estrictamente hablando, los solitones no están exentos de dispersión; pero sucede que son ondas en las que los efectos de la dispersión se cancelan exactamente por algún fenómeno compensador. La compensación sólo cabe en cierta clase de ondas: aquellas cuya ecuación de movimiento pertenece a una clase llamada no lineal. En la propagación de una tal onda interviene, además de la forma de la perturbación, la magnitud de la misma.

La primera observación registrada de un solitón fue realizada, hace casi 150 años, por John Scott Russell, un ingeniero y arquitecto naval. Russell dio cuenta a la British Association for the Advancement of Science: "Me hallaba contemplando el movimiento de un bote, que se desplazaba rápidamente a lo largo de un estrecho canal, tirado por un par de caballos, cuando se paró de repente la barca, no así la masa de agua del canal que el bote había puesto en movimiento; ésta se acumuló en la proa en un estado de violenta agitación; entonces, de pronto, dejando la barca detrás, avanzó con gran velocidad tomando la forma de una elevación grande, solitaria, una masa de agua redondeada, suave y bien definida, que continuó su curso a lo largo del canal aparentemente sin cambio de forma ni disminución de velocidad. Yo la seguí a caballo, y la alcancé

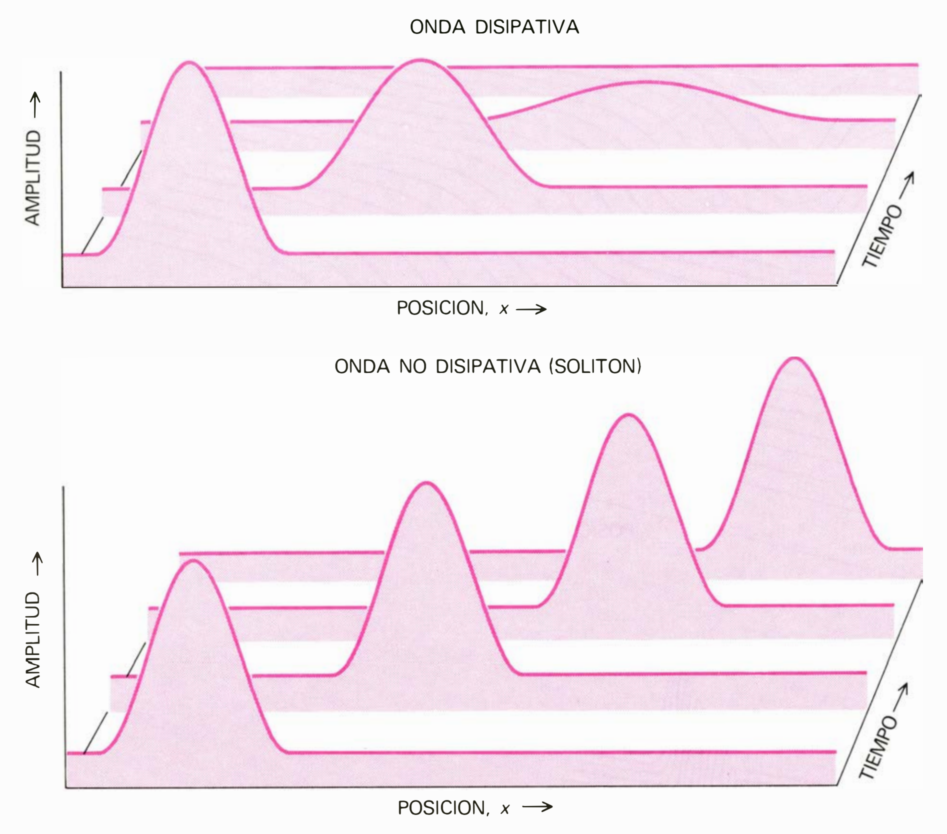
SOLITON
ANTISOLITON
TIEMPO
CAMPO
ANTISOLITON
SOLITON
POSICION, x

TIEMPO
ENERGIA
POSICION, x

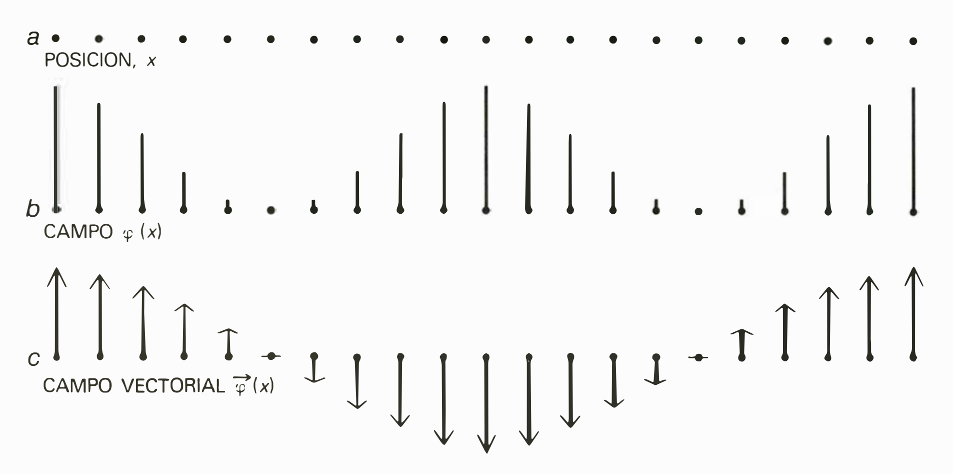
LITONES Y ANTISOLITONES, que aparecen como bucles o curvas dirección opuesta en la estructura de un campo. En la ilustración de ba se representa la evolución del propio campo; avanzando de delante , cada línea representa una configuración sucesiva del campo. La ilusón inferior muestra la distribución de energía correspondiente a cada guración. En el inicio de la secuencia, el solitón y el antisolitón se aproximan uno a otro; pero el antisolitón se mueve más deprisa y tiene, por tanto, mayor energía. Cuando las dos ondas se encuentran, se aniquilan entre sí y a partir de su energía se crea inmediatamente otro par solitón-antisolitón. El campo unidimensional (de una sola dimensión) en el que las ondas se propagan se llama campo de sine-Gordon. En cualquier otra parte fuera del solitón y el antisolitón, el campo toma valores de energía cero.

moviéndose a una velocidad de unas ocho o nueve millas por hora, manteniendo su forma original de unos 9 metros de largo por 30 o 40 centímetros de alto. Su altura disminuyó gradualmente, y, tras una persecución de una o dos millas, la perdí en las curvas del canal".

Scott Russell propuso que la estabilidad de la onda que había observado se debía a propiedades intrínsecas del movimiento de la onda y no a las circunstancias que la habían producido. Este punto de vista no se aceptó en seguida. Pero en 1895, D. J. Korteweg y Hendrik de Vries presentaron un tratamiento analítico completo de una ecuación no lineal en hidrodinámica y demostraron que podían existir ondas localizadas no disipativas. Desde entonces, los solitones se han convertido en fenómenos bien reconocidos en varios campos de la ingeniería y de las matemáticas aplicadas.



LA PERSISTENCIA DE UNA ONDA queda limitada principalmente por su dispersión, proceso por el cual las componentes de una onda que tienen diferentes longitudes de onda se propagan a distintas velocidades. Debido a la dispersión, una onda ordinaria *(arriba)* tiende a allanarse y a expandirse a medida que se mueve, y acabará desapareciendo por completo. El solitón es una onda que no se disipa porque los efectos de la dispersión se compensan con otros del movimiento de la onda; representa una cantidad de energía que puede moverse de un punto a otro, pero no puede expandirse en el espacio.

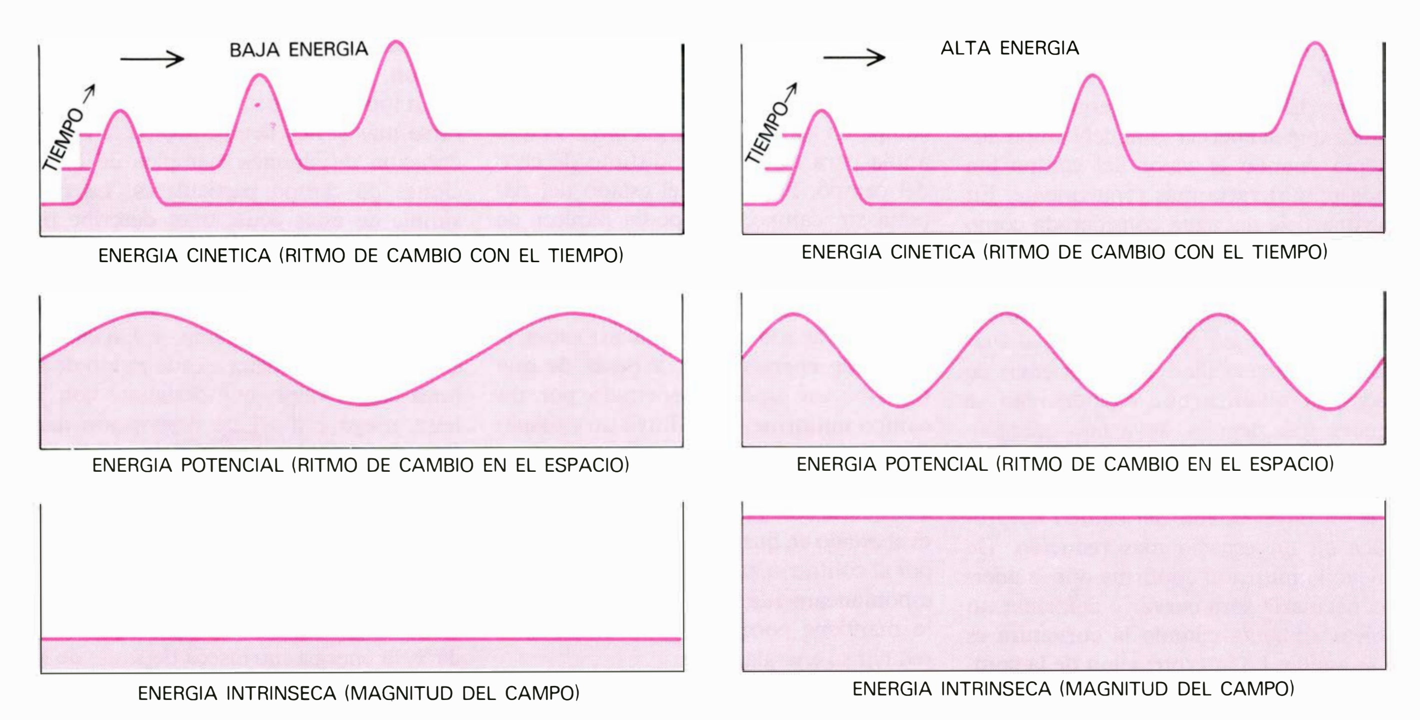


CAMPO EN EL ESPACIO, o medio en el que los solitones se propagan. Un campo asigna a cada punto en el espacio algún valor definido de una cierta cantidad. Aquí el espacio *(a)* es unidimensional, y los puntos que se muestran son unos pocos seleccionados entre un infinito continuo. En el caso más sencillo *(b)* sólo se mide una magnitud en cada punto, representada aquí por la longitud de un segmento de línea. Un campo más complicado, un campo vectorial *(c)*, tiene a la vez magnitud o módulo, y dirección, indicada por flechas. Para que un campo sea físicamente posible debe definirse en todas partes (aunque su valor sea cero); si cambia de un punto a otro, las variaciones han de ser suaves y contínuas.

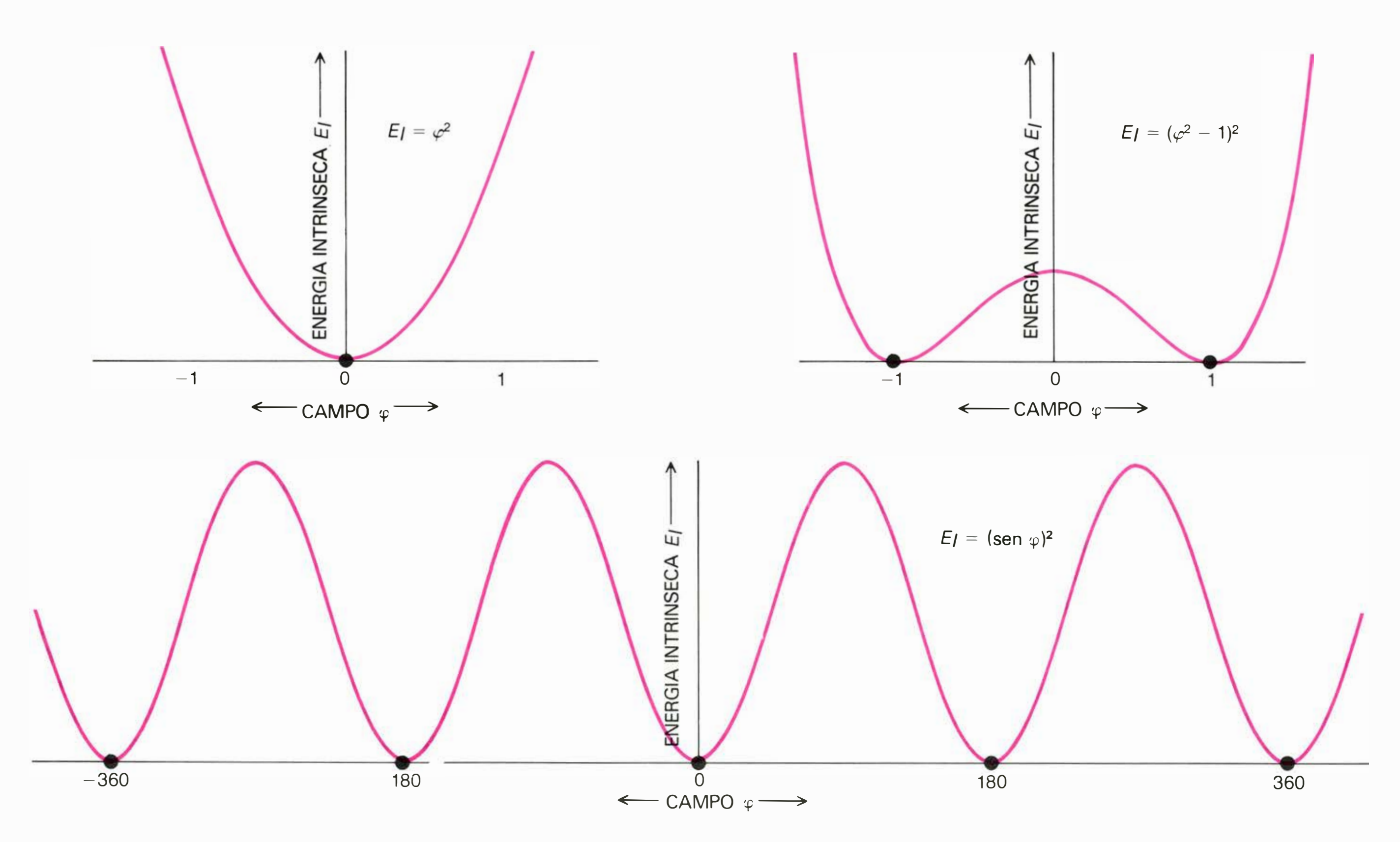
Los solitones de interés en física de partículas surgen de ecuaciones que describen campos o sistemas físicos que se extienden en el espacio. Un campo asigna a cada punto del espacio un valor de alguna cantidad específica, tal como el potencial eléctrico. A menudo se define más de una cantidad en cada punto. Los valores pueden cambiar de un punto a otro y de un instante a otro, pero lo deben hacer suave y continuamente.

El campo más familiar es el electromagnético, descrito por las ecuaciones de campo de James Clerk Maxwell. En la teoría de Maxwell se asignan seis valores a cada punto del espacio: representan las componentes de los campos eléctrico y magnético en cualquier terna de ejes ortogonales. La gravitación se describe también mediante ecuaciones de campo, las de la teoría general de la relatividad de Einstein. La superficie de un estanque puede considerarse como un modelo de un campo bidimensional. La cantidad que debe especificarse en cada punto es la posición vertical, o altura respecto algún nivel de referencia. Una onda que pasa por el agua es así una perturbación de este campo.

Una propiedad esencial de todo campo es que puede transportar energía, igual que lo puede hacer una partícula. La energía del campo por unidad de volumen se expresa matemáticamente como la suma de tres cantidades. Una de estas cantidades es proporcional al cuadrado del ritmo con que el campo varía en el tiempo. El segundo término tiene una forma parecida, y es proporcional al cuadrado del ritmo con que el campo varía en el espacio. La tercera cantidad no está determinada por un ritmo de variación, sino por la magnitud real del campo en cada punto. Se suele llamar al primer término energía cinética y a la suma de los otros dos términos energía potencial. En este análisis, sin embargo, será conveniente dar un nombre a cada una de las tres cantidades; así, llamaré energía intrínseca a la componente que depende de la magnitud real del campo, reservando el nombre de energía potencial para la componente que es proporcional al cuadrado del ritmo de variación espacial.



LA ENERGIA DE UN CAMPO es la suma de tres componentes, todas ellas ilustradas aquí en una superficie de agua, que puede considerarse como modelo de un campo. La energía cinética es proporcional al cuadrado del ritmo con que el campo varía en el tiempo; un campo con ondas que se mueven más deprisa tiene más energía. La energía potencial es proporcional al cuadrado del ritmo de variación espacial; un campo cuyas fluctuaciones tengan una longitud de onda más corta posee mayor energía. La energía intrínseca está determinada por la magnitud o módulo del campo, aunque la regla que relaciona estas dos cantidades puede tomar muchas formas. En el ejemplo del agua, un nivel más alto corresponde a una energía intrínseca mayor. La energía del campo es cero cuando el campo es estático y uniforme y se halla en una configuración que da energía intrínseca mínima.



ESTADOS VACIOS de un campo. Tales estados son las configuraciones de energía cero. Puesto que las energías cinética y potencial pueden siempre reducirse a cero tomando un campo estático y uniforme, para determinar los estados vacíos sólo debe considerarse la energía intrínseca. Aquí, la energía intrínseca se representa como una función de la magnitud o módulo del campo para campos descritos por tres ecuaciones sencillas. Si la energía aumenta como el cuadrado de la magnitud del campo *(a)*, hay sólo un estado vacío; la energía es cero cuando el propio campo es cero. Una variante de esta ecuación *(b)* proporciona un campo con dos estados vacíos. La energía es cero cuando el campo tiene los valores +1 o −1; ahora bien, y de un modo significativo, la energía es mayor que cero cuando el campo se anula. La energía del campo de "sine-Gordon" *(c)* es una función periódica y tiene un número infinito de estados vacíos. Si la magnitud del campo de "sine-Gordon" se interpreta como un ángulo en grados, entonces la energía es cero siempre que el módulo sea igual a cero, 180, 360, etcétera. Los solitones topológicos solamente ocurren en campos con múltiples estados vacíos.

Para este análisis podemos dar una imagen intuitiva de la energía del campo. El término de energía cinética indica que la energía total del campo aumenta cuando el valor del campo (en cada punto) varía más rápidamente. En la superficie del agua considerada como modelo de un campo, esta relación implica que la energía cinética es proporcional al cuadrado del ritmo de cambio de la posición; en otras palabras, al cuadrado de la velocidad. La experiencia de cada día muestra que cuando algo se mueve más deprisa, lleva más energía.

La energía potencial, tal como la he definido, aumenta cuando una cierta variación en el estado del campo se produce en un espacio más reducido. De nuevo la intuición confirma que la energía necesaria para curvar o deformar un objeto aumenta cuando la curvatura es más aguda. La interpretación de la componente intrínseca de la energía es aún más clara: no parece sorprendente que la energía de un campo dependa de la magnitud del campo. En el modelo del estanque, la energía intrínseca está relacionada con el nivel de la superficie del agua. Un nivel más alto corresponde a una energía mayor.

Como la energía cinética y la energía potencial de un campo son ambas el cuadrado de alguna cantidad, nunca pueden tomar un valor negativo. Al evaluar la energía intrínseca de un campo sólo hace falta considerar diferencias de energía, tales como la diferencia entre dos niveles de agua en un estanque. La mínima energía intrínseca observada puede tomarse, por tanto, como cero, de suerte que podamos también definir la energía intrínseca sin que nunca aparezcan valores negativos. Así, la energía total mínima del campo es cero.

El estado de un campo que tiene energía mínima o nula se llama estado vacío. Es evidente que, en el estado vacío, el campo debe ser constante en todo el espacio y el tiempo, pues cualquier variación daría a la energía cinética o potencial un valor mayor que cero. Así, para alcanzar el estado vacío, basta con minimizar la energía intrínseca. El vacío es el estado de un campo uniforme que tiene energía intrínseca nula.

Como la energía intrínseca viene determinada por la magnitud del campo, la configuración más obvia será aquella en que la energía intrínseca alcance su mínimo cuando el propio campo sea cero en todas partes. El vacío es entonces el estado sin campo, que corresponde a la noción intuitiva de vacío como espacio sin nada. Por sorprendente que parezca, ésta no es la única posibilidad. Hay ciertas ecuaciones de campo en las que la energía intrínseca se anula para algún valor distinto de cero del campo. Por tanto, el estado del sistema sin campo, que podía parecer de entrada que representaba el vacío, puede tener de hecho una energía mayor que otro estado con campo no nulo. Este otro estado es el verdadero vacío, el punto de energía cero, a pesar de que describe un espacio penetrado por un campo uniforme. Constituye un ejemplo de un campo de esta clase el campo magnético de un ferromagneto. El estado de mínima energía de un ferromagneto no es el estado en que no hay magnetización; por el contrario, un ferromagneto genera espontáneamente un campo magnético y lo mantiene porque, haciéndolo, puede reducir su energía.

Si la energía intrínseca puede anularse para algún valor del campo distinto de cero, bien pudiera ser cero para más de un valor. En realidad, ciertas ecuaciones de campo dan lugar a una multiplicidad de estados vacíos, cada uno de ellos asociado con un valor diferente del campo. Todos los estados vacíos son equivalentes (todos tienen la misma energía nula), pero son distintos. La existencia de dos estados vacíos, al menos, es una condición necesaria para la creación de los solitones que describiré aquí.

Supongamos que una onda, una excitación de un cierto campo, ocupa en un momento dado un volumen finito del espacio. Fuera de esta región no hay otras excitaciones, y el valor del campo es tal que la energía es cero en todas partes. El estado total del sistema no puede ser el vacío, porque hay energía en la onda. Pero a medida que la onda se dispersa, su energía se distribuirá en volúmenes mayores; y cuando se haya desparramado hasta el infinito, la energía por unidad de volumen habrá caído hasta cero. La onda habrá desaparecido y el campo tendrá un valor constante, vacío, en todo el espacio.

Si el campo es tal que puede tener múltiples estados vacíos, hay otra posible configuración del sistema. En las regiones que rodean una onda aislada pueden haber valores diferentes del campo, todos correspondientes al vacío, y no obstante distintos. Si la distribución topológica de los estados vacíos es tal que el campo no puede extenderse a un valor vacío estable en todo el espacio, entonces la onda no podrá expansionarse y dispersarse. El resultado será una perturbación estable del campo: un solitón.

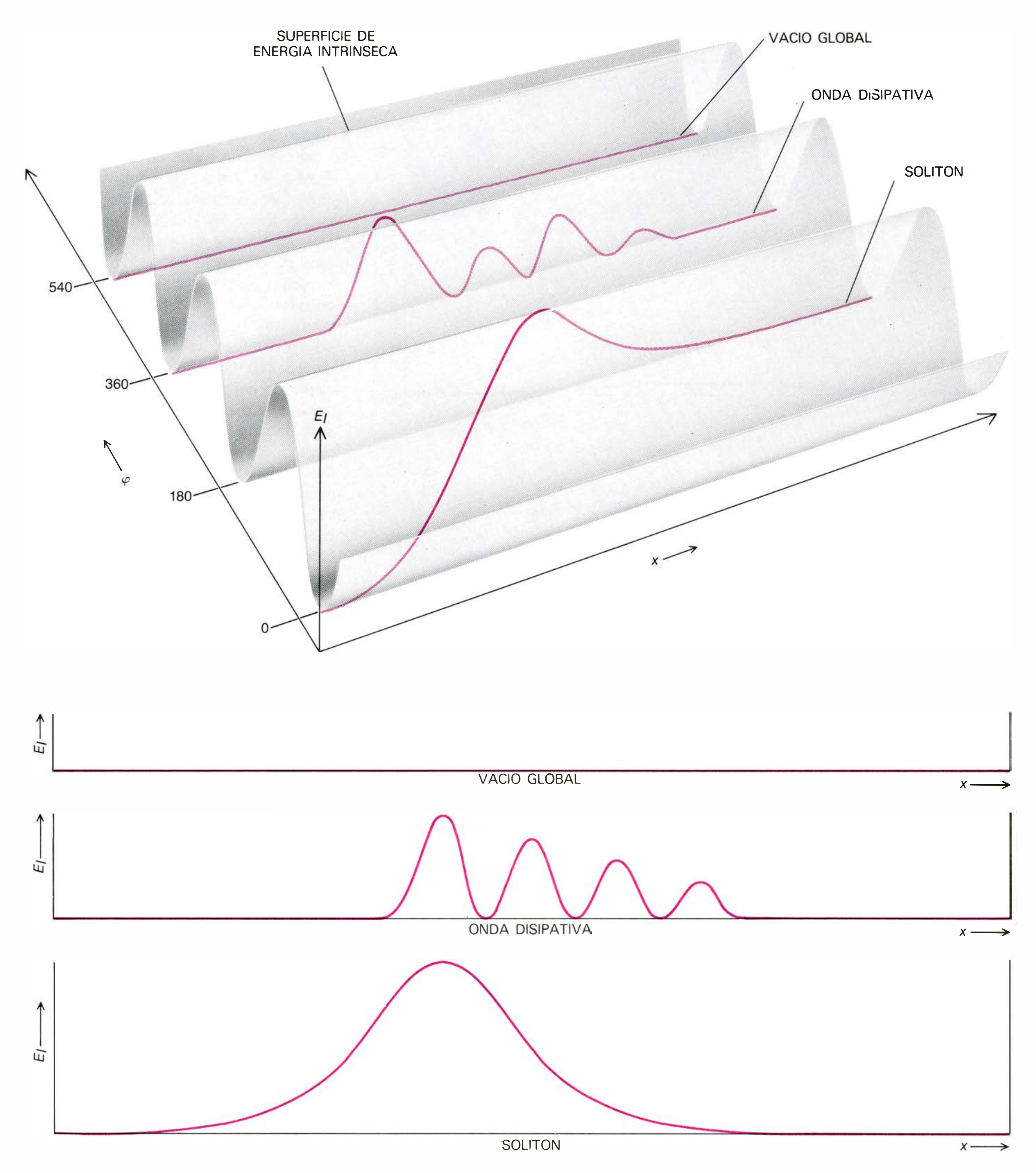
La topología de un solitón puede aclararse más si nos detenemos en la consideración de algunos ejemplos de ecuaciones de campo particulares. La más simple de estas ecuaciones describe un campo definido sobre un espacio unidimensional, una línea de longitud infinita donde cada punto puede identificarse por una única coordenada, x. Un campo en este espacio asigna a cada punto de la línea algún valor, que designaré con la letra griega φ (fi). Una descripción más formal del campo viene dada por la expresión matemática $\varphi(x)$. que se lee "φ es una función de x", o más brevemente "φ de x", y que significa que a cada punto de la línea corresponde un único valor del campo φ.

De la misma manera que φ depende de x, la energía intrínseca depende de φ. Esta dependencia queda patentizada mediante la notación $E_I(\varphi)$: la energía intrínseca es una función de φ; así, cada posible valor del campo tiene una energía intrínseca definida. El significado físico de estas fórmulas matemáticas se descifra fácilmente. Dado un punto, x, en el espacio unidimensional, el valor del campo se especifica en dicho punto sin ambigüedad. Dado el valor del campo en cada punto, se puede entonces calcular su energía intrínseca. Los solitones aparecen cuando varios valores del campo tienen la misma energía intrínseca mínima.

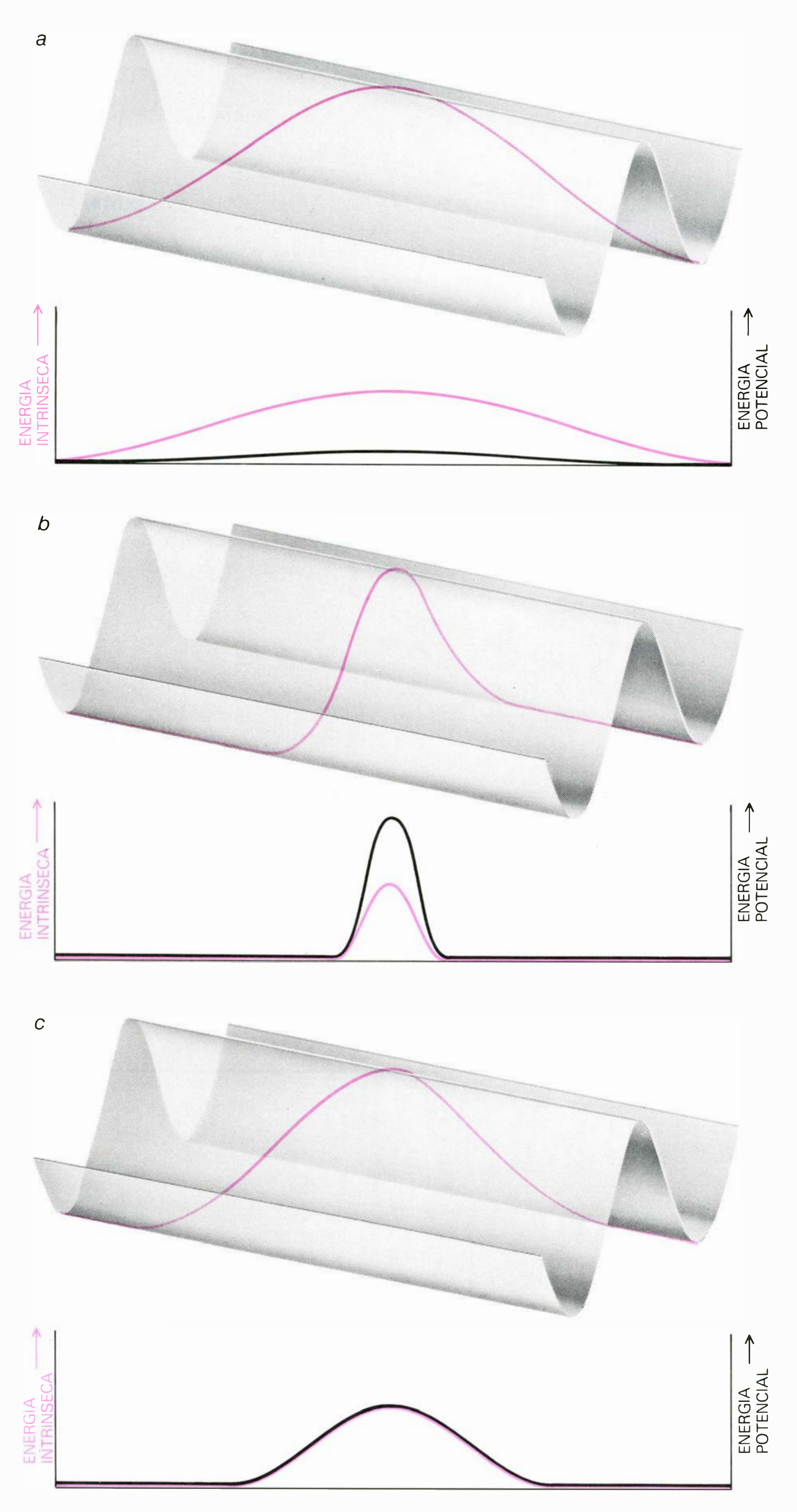
Una expresión de la energía intrínseca que puede dar lugar a solitones es la ecuación $E_I = (sen\ \varphi)^2$. La ecuación establece que para cada valor, φ, del campo, la energía intrínseca puede hallarse tomando el seno de φ y elevando el resultado al cuadrado. La ecuación del movimiento para ondas que se propagan en un campo que tiene esta propiedad se llama la ecuación de "sine-Gordon". Se trata de la modificación de otra ecuación discutida por primera vez en 1926 por Oskar Klein y Walter Gordon.

Las propiedades del campo de "sine-Gordon" pueden estudiarse poniendo valores numéricos de φ en la ecuación que define la energía intrínseca. No hace falta asignar dimensiones a estos valores. Para simplificar, supondré aquí que se han elegido las unidades, de manera que la energía intrínseca varíe entre cero y uno, y que φ se mide en grados.

El seno es una función trigonométrica cuyos valores varían de cero a $+1$ y de cero a -1, de manera que su cuadrado debe estar confinado en el rango de valores entre cero y $+1$. Si φ es igual a



SUPERFICIE DE ENERGIA del campo de "sine-Gordon", que ilustra las restricciones topológicas que confinan a un solitón. La distancia a lo largo del eje *x*, que se extiende hasta el infinito en ambas direcciones, da la posición de un punto en un espacio unidimensional. La distancia según el eje φ da la magnitud o módulo del campo en el punto *x* . La altura de la superficie de energía por encima del plano (según el eje E_I) da la energía intrínseca del campo en este punto. El campo de "sine-Gordon" tiene múltiples estados vacíos: las zanjas de la superficie de energía. Una línea que reposa en una de estas zanjas describe un estado vacío global; el campo tiene la misma magnitud en todas partes, y constituye una magnitud que corresponde a energía intrínseca cero. Una línea que oscila dentro de un valle representa una excitación local del campo, o una onda ordinaria. Como la línea se levanta por encima del fondo del valle, el campo lleva energía, pero la onda acabará dispersándose. Se forma un solitón cuando el campo toma diferentes valores vacíos a lo largo de las dos direcciones que conducen al infinito. Para el solitón mostrado aquí, el campo hacia la izquierda está en el estado vacío de $\varphi = 0$; pero, a la derecha, toma otro valor vacío de $\varphi = 180$. El campo debe ser continuo, y así en algún punto a lo largo del eje *x* debe cruzar la colina de la superficie de energía que separa los dos estados vacíos. El bucle de la zona de transición es el solitón. Puede desplazarse de un lado a otro, pero si la superficie es infinita, el bucle no puede deshacerse y el solitón nunca podrá dispersarse. En la figura inferior, la energía intrínseca de las tres configuraciones del campo se proyecta en una representación bidimensional. La onda disipativa y el solitón también tienen energía potencial, y, si se mueven, tienen energía cinética; pero, por razones de simplificación, estas cantidades no se indican aquí.



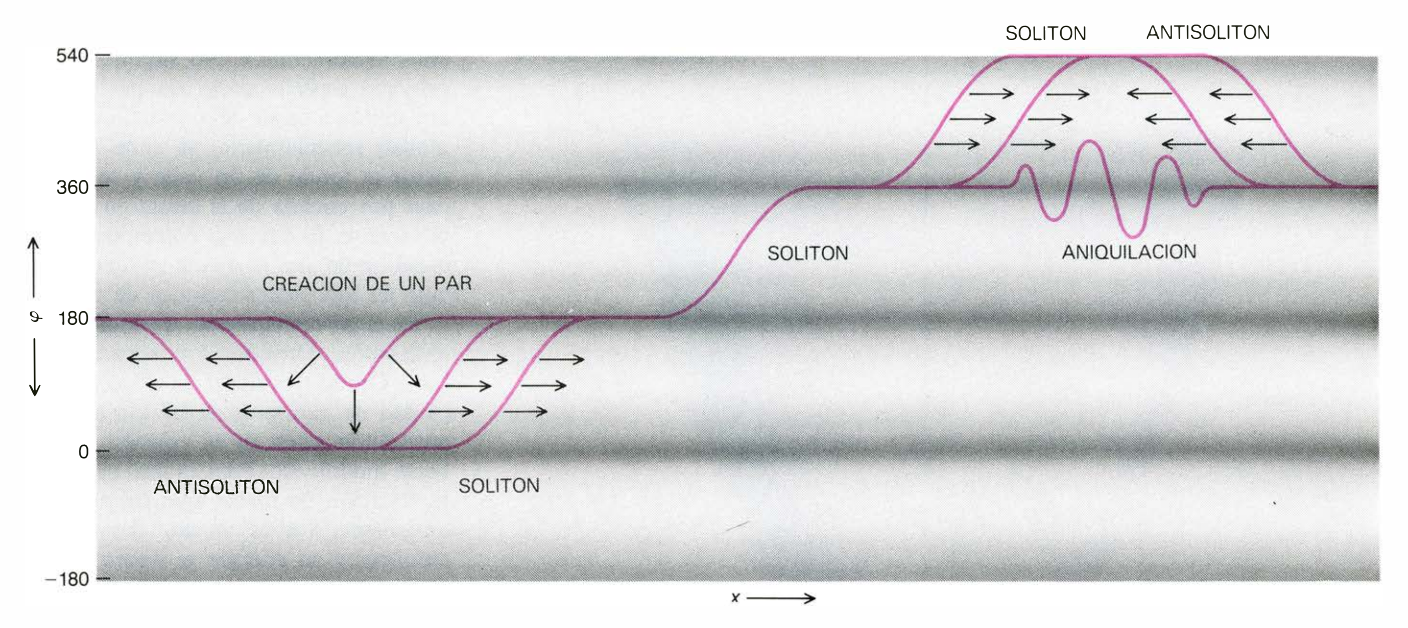
FORMA OPTIMA del solitón. La forma óptima es aquella que da la menor suma de las energías potencial e intrínseca. La energía potencial, al estar determinada por el ritmo de variación espacial, es mínima cuando la transición es gradual y la línea cruza la cresta con un ángulo pequeño *(a)*. Un largo segmento de la línea, sin embargo, está entonces cerca del pico de la energía intrínseca. La energía intrínseca se minimiza cuando la línea cruza la cresta casi perpendicularmente *(b)*, pero una transición tan abrupta hace grande la energía potencial. El mejor compromiso se logra cuando la línea cruza la cresta bajo un ángulo intermedio *(c)* y tanto la energía potencial como la intrínseca son iguales.

cero, el seno de φ y el cuadrado del seno también son cero; por tanto, la ecuación de "sine-Gordon" es tal que el estado sin campo es un estado vacío. Cuando φ aumenta de cero a 90, el seno y el cuadrado del seno aumentan suavemente, alcanzando un valor de 1 cuando φ es igual a 90. Pero si φ continúa aumentando, el cuadrado del seno decrece y vuelve a ser cero cuando φ es igual a 180. Este valor de φ indica, por tanto, otro estado vacío del sistema. Con un aumento continuo de φ, el seno se hace negativo, pero el cuadrado del seno, obviamente, se mantiene positivo; y de nuevo tiene un valor de 1 cuando φ es igual a 270. Cuando φ es igual a 360, el cuadrado del seno es cero de nuevo, representando otro estado vacío. Cuando φ se hace igual a 540, 720, 900, 1080, etcétera, se alcanzan estados adicionales de energía intrínseca cero. Así, al aumentar φ, hay una infinidad de estados vacíos posibles, cada uno separado del vacío próximo por una barrera en la que la energía intrínseca crece suavemente hasta un valor 1.

Podemos representar la configuración de un campo unidimensional mediante un gráfico bidimensional, es decir, por un gráfico en un plano. En un eje se recogen todos los puntos, x, del espacio unidimensional; el otro eje representa todos los posibles valores del campo φ. Para cada punto x, se hace una señal en el plano en una posición correspondiente al valor del campo en aquel punto. Puesto que el campo debe definirse en cada punto, y los valores deben formar un continuo, las señales pueden conectarse siempre formando una línea o una curva. Si la línea es recta y paralela al eje x, significa que nos hallamos ante un estado en el que el campo es constante en todos los puntos.

A fin de representar la energía intrínseca del campo, se añade una tercera dimensión al gráfico: la energía intrínseca se hace proporcional a la altura por encima del plano. Para el campo de "sine-Gordon", los puntos que representan la energía intrínseca de cada posible valor del campo forman una superficie ondulada sinusoidalmente. En esta superficie de energía, las ondulaciones son paralelas al eje x y tienen zanjas de energía cero donde φ es igual a cero, 180, 360, etcétera [*véase la ilustración de la página anterior*].

En este gráfico tridimensional, la configuración del campo se representa mediante una línea situada sobre la ondulante superficie de energía. Una posible configuración está representada por una línea recta que permanece en el fondo de una de las zanjas, digamos la zanja de



CREACION Y ANIQUILACION de solitones. Recuerda a las correspondientes operaciones entre partículas mecánico-cuánticas. En el campo "sine-Gordon" una sección de la línea que describe el estado del sistema puede subirse desde el fondo de un valle y dejarse caer por encima de la cresta en el valle vecino. El resultado es la creación simultánea de un solitón y un antisolitón, que pueden alejarse del punto. En el proceso inverso, observamos que un solitón y un antisolitón se encuentran y se aniquilan entre sí. Las ecuaciones que gobiernan el campo de "sine-Gordon" siempre crean otro par inmediatamente después de la aniquilación, pero en otros sistemas de solitones la energía de las ondas puede disiparse de manera diferente.

$\varphi = 180$. El significado del gráfico es que el campo tiene una magnitud de 180 en cada punto del eje *x*. No varía en el espacio, y, a menos que sea perturbado por alguna influencia externa, no puede variar en el tiempo. Además, como $\varphi = 180$ constituye uno de los valores del campo para los que la energía intrínseca es cero, la energía total del campo será nula. El campo está en uno de sus muchos estados vacíos equivalentes: por tratarse del mismo estado en todas partes, se le llama un vacío global.

Aparece otra configuración cuando se introduce una pequeña perturbación en una línea que esté en una de las zanjas de energía intrínseca nula. En el lugar de la perturbacion, la línea que representa el estado del sistema sube un poco por una pared del valle, vuelve al fondo y sube por la otra pared; continúa luego este sinuoso esquema en una serie de oscilaciones que se hacen progresivamente más pequeñas. El gráfico corresponde a una excitación ondulante del campo; si bien se trata de una que acabará dispersándose. Donde la línea sube por encima del fondo del valle, el campo tiene energía intrínseca, y como varía en el espacio, tiene energía potencial. El propio proceso de dispersión añade energía cinética. A medida que la onda se expande por la longitud infinita de la línea, la energía por unidad de longitud tiende a cero, y el campo vuelve al estado estable del vacío global.

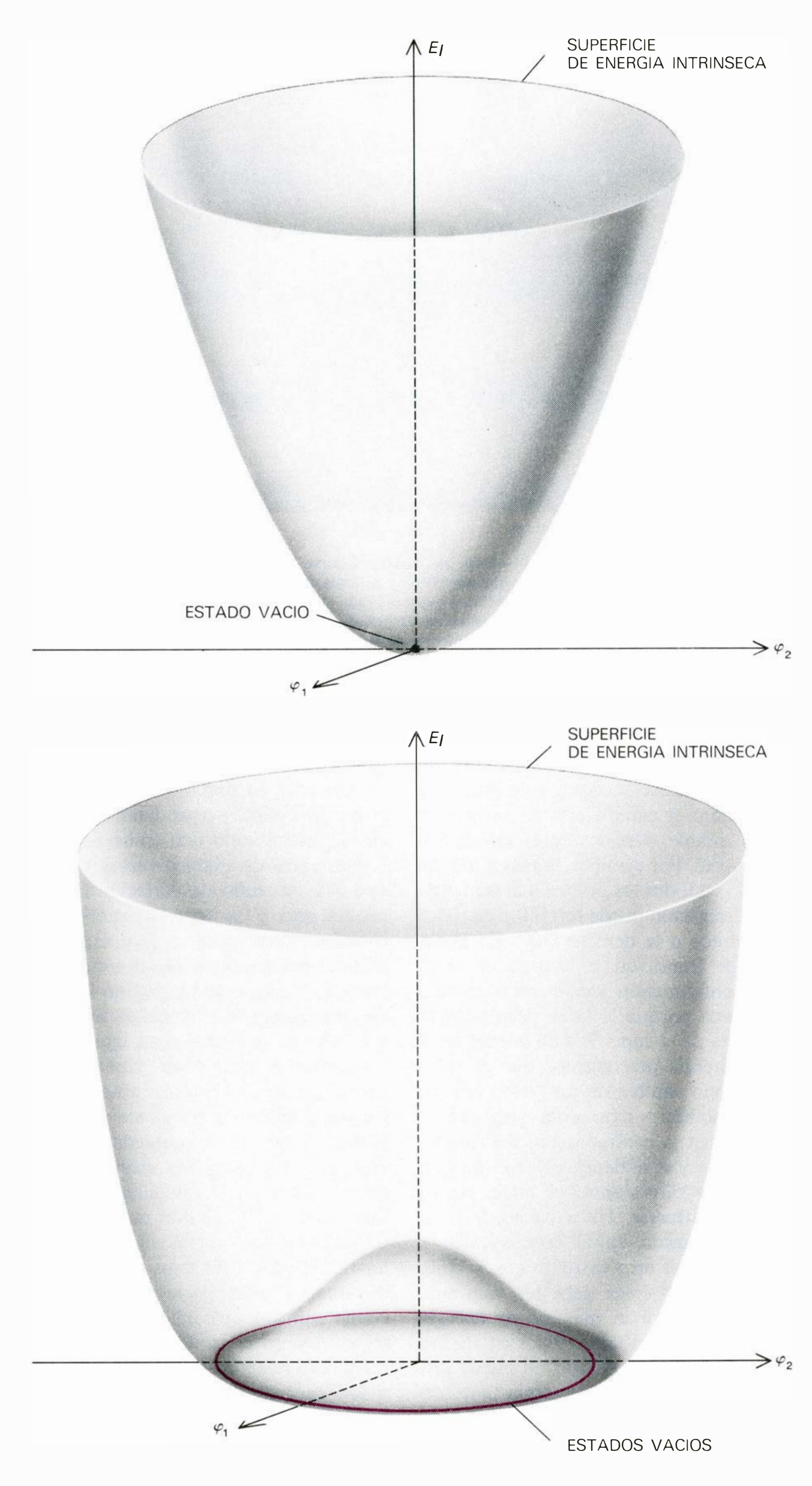
En el campo de "sine-Gordon" aparece un solitón cuando la línea que representa el estado del sistema sube desde el fondo de un valle en la superficie de energía, cruza la cresta y baja al fondo de un valle adyacente. Alejándose en cualquier dirección desde este punto de transición, el campo está en un estado vacío estable, pero no en el mismo estado vacío. Por ejemplo, la magnitud del campo en todos los puntos a la izquierda de la transición puede ser 180 y en todos los puntos a la derecha 360. En la región de transición, el campo no tiene una configuración vacía. Porta energía intrínseca porque la línea debe superar la colina de la superficie de la energía, y tiene energía potencial porque el valor del campo cambia de un punto a otro.

El solitón representa un bucle ("kink") en la configuración del campo; si la línea *x* se extiende hasta el infinito en ambas direcciones, el bucle nunca podrá deshacerse. Un extremo de la línea está ligado en el estado vacío a $\varphi = 180$ y el otro extremo a $\varphi = 360$. Puesto que la línea debe ser continua, habrá de cruzar el máximo de energía entre estos dos estados vacíos en alguno de sus puntos. El solitón no puede dispersarse nunca, ni su energía tampoco podrá disiparse jamás.

La energía de un solitón en el campo de "sine-Gordon" depende de la geometría de la transición entre estados vacíos. La energía potencial se hace mínima cuando el campo varía tan lentamente como sea posible; por tanto, cuando la línea cruza la cresta con un ángulo suave, casi paralelo al eje *x*. En tal configuración, empero, la línea queda elevada respecto el fondo del valle en una distancia considerable, y la energía intrínseca es alta. La energía intrínseca alcanza su mínimo cuando la línea cruza la colina perpendicularmente al eje *x*, presentando una transición muy brusca entre los estados vacíos; pero en este caso el ritmo de variación espacial resulta alto y la energía potencial alcanza un valor extremo. La energía total mínima del solitón se alcanza cuando el cruce es suave y de un ángulo intermedio, de manera que la energía intrínseca y la energía potencial sean iguales.

Aunque el campo de "sine-Gordon" manifiesta una estructura notablemente simple, el solitón que aparece en él tiene varias e importantes propiedades en común con las partículas materiales. Ya hemos discutido la estabilidad del solitón en reposo. El solitón puede ponerse también en movimiento sin alterar su forma: la región de transición entre los dos estados vacíos corre a lo largo de la colina con una velocidad constante. Incluso cuando el solitón está en movimiento, la anchura de la región de transición permanece constante, y el único cambio en la energía consiste en la adición de un término para la energía cinética.

No hay nada en la ecuación de "sine-Gordon" que restrinja el campo a configuraciones con un solo solitón. En principio, cabría un número ilimitado de solitones y antisolitones. Por convención, un solitón es un bucle en el que el campo aumenta (desde un valor vacío al siguiente) al crecer *x*, y un antisolitón es



LOS CAMPOS BIDIMENSIONALES pueden incorporar solitones si hay múltiples estados vacíos con una topología apropiada. Los campos están definidos por dos cantidades en cada punto del espacio, llamadas φ_1 y φ_2. Cada combinación de φ_1 y φ_2 implica una energía intrínseca definida, que está dada por la superficie de energía del campo. En una posible teoría de campos *(diagrama superior)*, la energía es cero sólo cuando las dos componentes del campo son cero; en este campo no pueden ocurrir los solitones. Estos pueden aparecer cuando la superficie de energía tiene una estructura algo más complicada *(diagrama inferior)*. Aquí, un campo cuyas componentes son ambas cero tiene una energía definida no nula. Los estados vacíos del campo son las combinaciones de φ_1 y φ_2 que describen una circunferencia de radio unidad. Si φ_1 y φ_2 constituyen las componentes de un vector, entonces el campo en cuestión tiene energía cero cuando la magnitud, o módulo, del vector es 1, cualquiera que sea su dirección.

un bucle en que el campo decrece cuando aumenta x. No supone ningún esfuerzo especial crear un par solitón-antisolitón a partir de un estado de vacío global; sencillamente, se sube la línea desde el fondo de un valle y se la deja caer por encima de la cresta en el valle adyacente. El proceso corresponde a la creación de una partícula y su antipartícula en una teoría cuántica de campos.

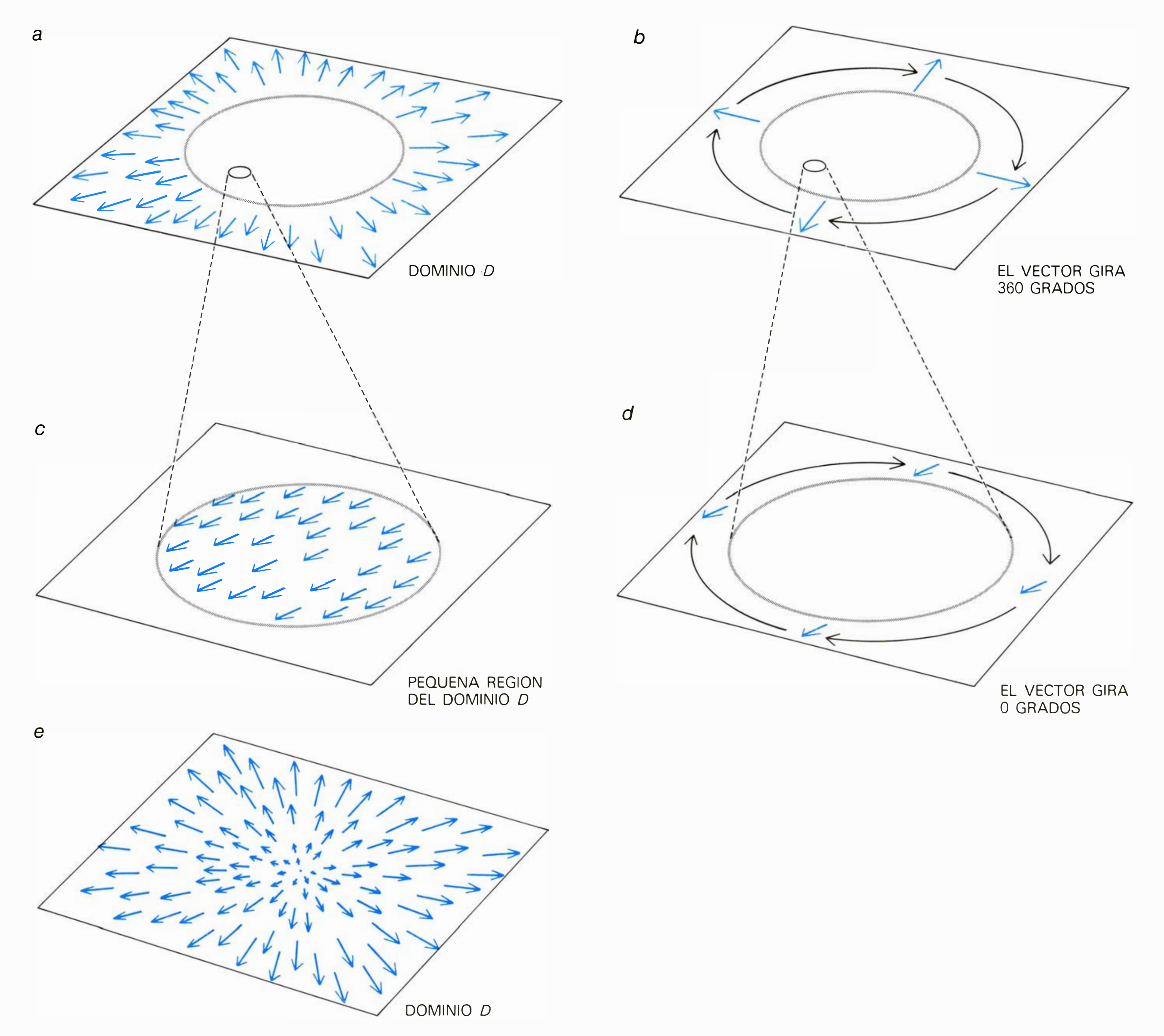
En el proceso inverso, un solitón y un antisolitón chocan. La ecuación de "sine-Gordon" ostenta la especial propiedad de que tanto el solitón como el antisolitón salen de la colisión sin haberse modificado. Pero es fácil modificar la ecuación de forma que las ondas se aniquilen. Ambos bucles desaparecen entonces y su energía se disipa en una onda que se dispersa en el vacío global. La aniquilación mutua se observa también entre partículas y antipartículas. Como un par solitón-antisolitón puede crearse o aniquilarse fácilmente, sólo se conserva la diferencia entre el número total de estos objetos. Así, un campo dado puede anularse en una dirección a un valor de $\varphi = 180$ y en la otra dirección a $\varphi = 360$, pero puede haber siete solitones y seis antisolitones en la región de transición entre estos dos valores. Puede provocarse la mutua aniquilación de seis solitones y seis antisolitones, pero no hay manera de eliminar el último solitón.

Es fácil hacer un modelo de la superficie de energía del campo de "sine-Gordon". Dóblese un trozo de papel grueso en varios pliegues, como un acordeón; y, si es posible, en suaves ondulaciones. Colóquese luego un trozo de cadena de llavero flexible sobre la superficie. Si la cadena empieza en el fondo de un pliegue y acaba en otro, debe existir un solitón donde la cadena cruza desde un estado vacío al otro. La conservación absoluta del solitón no puede probarse a menos que la superficie y la cadena se hagan infinitamente largas, pero pueden estudiarse otras propiedades determinadas. Si inclinamos la superficie, podremos hacer que se mueva el solitón; con una manipulación cuidadosa puede observarse incluso la creación y aniquilación de pares solitón-antisolitón. Yo vi por primera vez una demostración con este modelo hecha por Holger Nielsen, un físico danés pionero en el terreno de la investigación de los solitones.

Podría parecer que el campo de "sine-Gordon" no es más que una construcción arbitraria sin ningún punto de contacto con el mundo real. Por tratarse de un campo monodimensional, su poder descriptivo es necesariamente limitado.

Aún más, los múltiples estados vacíos, esenciales para la existencia de los solitones, se introducen a través de una hipótesis que algunos supondrán un tanto artificial; a saber: la hipótesis de que la energía intrínseca es una función periódica del campo. Sin embargo, hay fenómenos físicos en el mundo tridimensional que están efectivamente confinados a una dimensión. Constituye un ejemplo de ellos el movimiento de electrones a lo largo de una pila de moléculas; la ecuación de "sine-Gordon" se ha aplicado al análisis de este sistema y de otros parecidos. La variación periódica de la energía intrínseca tampoco está muy lejos de la experiencia. Consideremos la energía de un péndulo expresada en función del ángulo que mide la desviación respecto de la vertical. A medida que el ángulo aumenta desde cero grados, la energía crece hasta un máximo cuando el ángulo mide media vuelta; vuelve luego a cero después de una vuelta entera, y así sigue pasando por muchos máximos y mínimos equivalentes, a medida que el ángulo continúa aumentando.

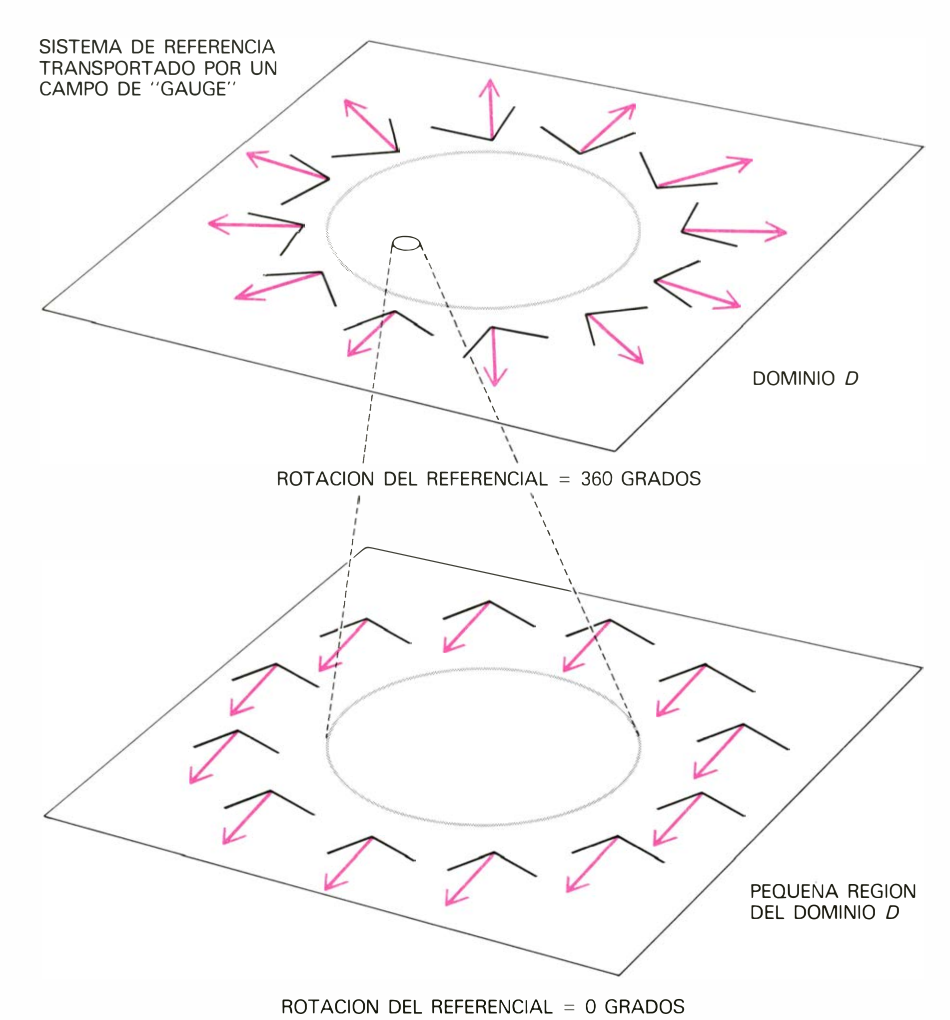
La semejanza cuantitativa entre solitones del campo de "sine-Gordon" en



CONFINAMIENTO DE UN SOLITON en un espacio bidimensional (de dos dimensiones), demostrado por un argumento topológico. El espacio (un plano) está recubierto por un campo vectorial, un campo definido en cada punto por una magnitud y una dirección. Fuera de algún dominio arbitrario, *D*, se observa que el campo radía desde *D* y su módulo o magnitud es en todas partes igual a 1 *(a)*. Un campo de esta magnitud (pero sólo uno de esta magnitud) se supone que tiene energía intrínseca cero, y así en todas partes fuera de *D* el campo se halla en un estado vacío. Una posibilidad sería que el vacío pudiese continuar dentro de *D*. Que esto no es posible, se prueba de la siguiente manera. Imaginemos que recorremos el perímetro de *D* llevando una flecha que siempre permanece paralela al campo *(b)*. Después de completar un circuito, la flecha vuelve a su posición original, pero ha girado una vuelta. Ahora examinemos una región microscópica cualquiera interior a *D*; si la región seleccionada es suficientemente pequeña, el campo interior debe ser uniforme, con todos los vectores paralelos *(c)*, ya que no pueden comprimirse grandes variaciones del campo dentro de un espacio arbitrariamente pequeño. La flecha no girará lo más mínimo al desplazarla sobre los distintos puntos de esta región *(d)*. Podemos imaginar muchos otros desplazamientos circulares sobre regiones de tamaño intermedio entre las anteriores; en los circuitos mayores, la flecha girará todavía una vuelta entera y, para los más pequeños, la flecha no girará. Para algún circuito, sin embargo, debe haber una transición, donde la rotación del campo vectorial cambie de 360 grados a cero grados. Un teorema de topología establece que una tal transición sólo es posible si el propio campo se anula en algún punto interior a *D*, de modo que la dirección de la flecha no está definida. Se sigue que en algún punto dentro de *D*, el campo debe ser cero y la configuración más plausible es un decrecimiento suave hasta valer cero en el centro *(e)*. Un campo de magnitud cero, sin embargo, no se halla en un estado vacío; tiene energía mayor que cero. Se trata de la energía del solitón, que está confinado por un "twist" o "bucle" en la estructura del campo.

interacción y las interacciones de ciertas partículas se ha extendido hasta una equivalencia formal. En 1958, Walter E. Thirring, de la Universidad de Viena, formuló un modelo mecánico-cuántico de partículas y antipartículas moviéndose en un espacio unidimensional. Sidney R. Coleman, de la Universidad de Harvard, ha demostrado recientemente que el modelo de Thirring y los solitones de la ecuación de "sine-Gordon" describen los mismos fenómenos. En el modelo de Thirring se supone que existen las partículas y se les hace obedecer un cierto esquema de interacciones; los solitones, por otro lado, no se introducen a priori, sino que surgen naturalmente de las ecuaciones del movimiento. No obstante, los dos tipos de objetos se propagan e interaccionan de igual modo.

Dejando de lado los éxitos notables de la teoría de "sine-Gordon", es innegable que el mundo real tiene tres dimensiones espaciales en vez de una sola. Si los solitones existen como partículas reales, deben aparecer en una teoría tridimensional. Desde hace pocos años se conocen ondas bidimensionales con las propiedades de los solitones; el descubrimiento de solitones tridimensionales es todavía más reciente. Estos últimos pueden existir en la naturaleza como partículas: los solitones bidimensionales son de interés en otras ramas de la física y constituyen modelos útiles para ilustrar las propiedades de los tridimensionales. De hecho, una vez se ha hecho el salto de la línea al plano, no se encuentran ya más barreras conceptuales al pasar a hiperespacios pluridimensionales.



LOS CAMPOS DE GAUGE alteran la descripción de un solitón en dos o tres dimensiones. Para que un solitón exista, un campo que radie desde un dominio *D* debe estar en un estado vacío fuera de *D*. Haciendo la magnitud o módulo del campo igual a 1 hacemos cero la energía intrínseca, pero también debe tenerse en cuenta la energía potencial. Puesto que una disposición radiante de vectores cambia de dirección de un punto a otro, la energía potencial no parece ser cero. El dilema se resuelve introduciendo un nuevo campo, el campo de gauge, que proporciona una prescripción para transportar un sistema de referencia de un punto a otro. Fuera de *D*, el sistema de referencia gira exactamente la cantidad necesaria para mantener constante en todos los puntos la dirección del campo vectorial (cuando la dirección se mide con respecto al sistema de referencia o referencial transportado). En una pequeña región interior a *D* no giran ni el vector ni el sistema de referencia. Con la introducción del campo gauge, se elimina la energía potencial del campo original, pero persiste el confinamiento topológico del solitón. Ahora es el campo de gauge aquel cuya rotación neta cambia de 360 a cero grados.

La estabilidad de muchos solitones en espacios de más dimensiones puede demostrarse mediante argumentos topológicos parecidos a los empleados en el campo de "sine-Gordon", aunque cueste más visualizar la configuración geométrica de los campos. En dos dimensiones, el valor de un campo es una función continua de la posición en un plano. Podemos construir un gráfico del campo dibujando el plano y haciendo que la altura encima de cada punto represente el valor del campo en dicho punto. El conjunto de todos los valores forma una superficie levantada sobre el plano: si el campo es constante, se trata de una superficie llana paralela al plano; si el campo cambia de un punto a otro, estamos ante una superficie más complicada. En tres dimensiones, el campo debe definirse en cada punto del espacio ordinario; no se puede dibujar, sin embargo, el gráfico de un campo tridimensional excepto en un espacio hipotético de cuatro dimensiones. Por otro lado, las propiedades de los campos de dos y tres dimensiones son muy parecidas, de manera que, casi siempre, el campo más simple puede servir para ilustrar ambos.

En una dimensión, la propiedad esencial para la existencia de solitones fue la presencia de múltiples estados vacíos, en los que la energía intrínseca se anula para varios valores del campo. Aparece un solitón cuando el campo tiende a distintos valores vacíos, a medida que uno de éstos se va hacia el infinito en direcciones opuestas de la línea. En un plano, el infinito puede alcanzarse desde un origen elegido, siguiendo cualquier dirección; el mismo número de direcciones que conducen al infinito es infinito. Las direcciones pueden ponerse en una correspondencia biunívoca (una a uno) con los infinitos puntos de la circunferencia de un círculo. La situación es la misma en el espacio tridimensional, en el que las direcciones del infinito se corresponden con los puntos de la superficie de una esfera. Para que exista un solitón en cualquiera de estos espacios, el campo debe tender a distintos estados vacíos a lo largo de cada dirección posible.

La peculiaridad topológica que da lugar a los solitones no es posible para cualquier campo en dos o tres dimensiones, ni siquiera para todos los campos que tienen múltiples estados vacíos. Una condición es que el propio campo esté definido por más de una cantidad en cada punto. Los campos que estudiaremos aquí se hallan especificados por dos valores en cada punto en el espacio de

dos dimensiones y por tres valores en el espacio tridimensional. Se les llama campos vectoriales porque las dos o las tres cantidades se pueden considerar como las componentes de un vector según dos o tres ejes ortogonales. El campo vectorial se designa escribiendo el símbolo del campo con una flecha sobre él: $\vec{\varphi}$. La energía intrínseca de un campo vectorial de dos componentes puede representarse como una superficie dibujada sobre un plano. El plano no es el del espacio bidimensional, sino un plano que da todos los posibles valores del campo vectorial o todas las posibles combinaciones de módulo o magnitud y dirección del vector $\vec{\varphi}$.

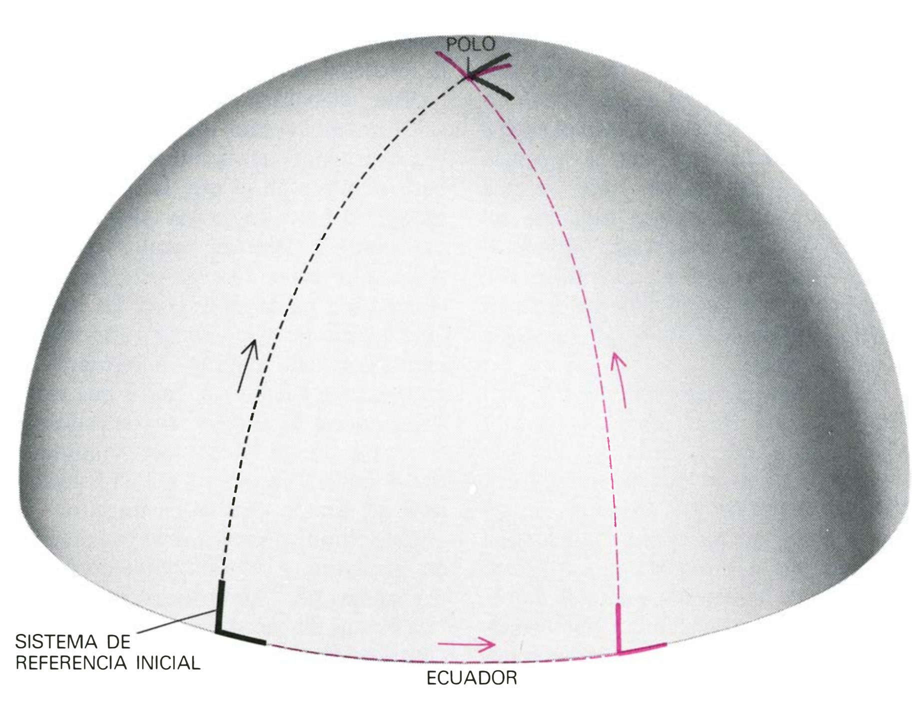
Una ecuación plausible para calcular la energía intrínseca como función del campo vectorial es $E_I = (\vec{\varphi})^2$. La superficie de energía intrínseca descrita por esta ecuación es un paraboloide, la superficie generada cuando una parábola gira alrededor de su eje. La energía intrínseca sólo tiene un mínimo en la punta del paraboloide que corresponde al origen del plano de energía intrínseca. Por tanto la energía intrínseca es cero sólo cuando la magnitud, o módulo, del campo es cero. Como el campo sólo tiene este estado vacío, correspondiente a la ausencia del campo, los solitones topológicos no son posibles.

Supongamos que la energía intrínseca se dé por una ecuación un poco distinta, $E_I = (\vec{\varphi}^2 - 1)^2$. En este caso, la energía intrínseca no es cero en el origen del plano; cuando $\vec{\varphi}$ es igual a cero, la energía intrínseca es igual a $(-1)^2$, o simplemente 1. Por tanto, el estado sin campo no es el estado vacío. El verdadero estado vacío se encuentra cuando la magnitud o módulo de $\vec{\varphi}$ es igual a 1, pues entonces $(\vec{\varphi}^2 - 1)^2$ es igual a cero. La ecuación $(\vec{\varphi}^2 - 1)^2 = 0$ es la ecuación de un círculo: se satisface por todos los puntos de la circunferencia cuyo centro está en el origen y cuyo radio es la unidad. El campo está, por tanto, en un estado vacío siempre que el módulo del vector sea 1, independientemente de su dirección. La superficie de energía completa tiene una estructura curiosa. A grandes distancias del origen se parece mucho a un paraboloide, aunque tiene más pendiente. Cerca del origen, la superficie alcanza un mínimo en todos los puntos del círculo en que el módulo de $\vec{\varphi}$ vale la unidad; sube luego de nuevo dentro de este círculo. La superficie es como un paraboloide cuártico con un bulto en su vértice [*véase la ilustración de la página* 72].

¿Qué implica esta superficie de energía en el terreno de las posibles configuraciones de un campo vectorial de dos dimensiones? Una consecuencia de particular importancia en este análisis es que el campo puede tener energía intrínseca cero si el módulo del campo vectorial vale, en todas partes, la unidad, independientemente de la dirección del vector. Consideremos un campo en el que se hayan medido su magnitud y dirección en todos los puntos de un plano exteriores a algún dominio arbitrario D. La magnitud o módulo del vector se ha encontrado igual a 1 en todas partes, y su dirección es tal que el vector siempre apunta alejándose del origen, que es interior al dominio D. Por tanto, fuera de D, el plano está lleno de vectores de longitud unidad y que parecen irradiar a partir de D. En todas partes fuera de D, el campo se halla en un estado vacío, pues el vector unidad corresponde a energía intrínseca cero. Debemos preguntarnos entonces: ¿Puede el estado vacío extenderse también dentro de D, de manera que el campo tenga energía intrínseca cero en todas partes? A lo que hay que responder negativamente. La demostración de que no puede es de naturaleza topológica, y muestra que D debe rodear una región de energía finita: un solitón bidimensional.

Imaginemos que damos una vuelta alrededor del dominio D llevando una flecha que siempre apunte en una dirección paralela a la del campo. Al volver al punto de origen, la flecha estará apuntando en la misma dirección que tenía cuando empezó la vuelta, pero habrá descrito un círculo entero, una rotación de 360 grados. Imaginemos ahora que examinamos una región microscópica dentro de D. Parecería lo más plausible que el esquema de vectores se reprodujese a menor escala en esta región, pero un argumento sencillo demuestra que una tal configuración del campo es imposible. Si el campo tuviese que hacer una rotación de 360 grados dentro de una región microscópica, el ritmo de variación espacial y por tanto la energía potencial sería enorme. A medida que el área de la zona tendiese a cero, la energía potencial no estaría acotada. Se sigue por tanto que si se puede elegir una zona de área suficientemente pequeña, el campo dentro de ella debe ser uniforme: los vectores en todos los puntos deben tener no sólo el mismo módulo sino también la misma dirección. Así, una zona microscópica de D tendría un campo en que todos los vectores serían paralelos. Una flecha llevada alrededor de esta zona nunca se desviaría de su dirección original; no giraría.

El método de llevar una flecha alrededor de una trayectoria cerrada en el campo ilustra un teorema de topología. El teorema establece que si el campo no tiene discontinuidades y no se anula en



TRANSPORTE de un sistema de referencia según la prescripción de un campo de gauge. El transporte es análogo al transporte sobre la superficie de la tierra. Si el sistema de referencia se transporta desde su posición original, en el ecuador, al polo, alcanza una orientación final *(negro)*; pero si se mueve primero a lo largo del ecuador, y después hacia el polo, conduce a una orientación final distinta *(color)*. La rotación correspondiente a un desplazamiento depende de la trayectoria. La rotación se debe a la curvatura de la tierra. En el espacio abstracto el campo de gauge tiene un efecto equivalente a la curvatura.

ningún punto, entonces la flecha debe girar un número entero de veces durante cada circuito. La flecha puede no girar en absoluto, en cuyo caso el entero es nulo, o puede girar una, dos, o más veces, pero no puede hacer media vuelta. Aquí no daremos ninguna demostración de este teorema, aunque el sentido común indica que debe ser cierto, ya que la flecha debe volver a su posición original al final de cualquier circuito cerrado.

El teorema es satisfecho por el circuito exterior a *D*, en que el vector gira 360 grados, y por el circuito microscópico interior, en el que la rotación es cero. ¿Qué sucede, sin embargo, en algún circuito en una escala intermedia? En algún punto, a medida que se reduce el tamaño de la región examinada, la rotación del campo debe hacer una transición de 360 a cero grados. El teorema topológico prohíbe un circuito con una rotación no entera, pero incluye dos posibles escapatorias. Una posibilidad es la que el campo tenga una discontinuidad, donde su valor cambie bruscamente de un punto al próximo. Esta posibilidad queda excluida, sin embargo, por la exigencia de que todos los campos físicos muestren sólo cambios suaves y continuos. La única posibilidad que queda es que en algún punto interior a *D* el valor del campo se anule. En un tal punto, la rotación puede cambiar de 360 a cero grados, porque donde el campo se anula la dirección del vector es indefinida.

Esta elaborada argumentación ha sido presentada con un propósito: probar que dentro del dominio *D* debe haber un punto en el que la magnitud o módulo del campo no sea igual a 1; por el contrario, debe ser igual a cero. Se sigue, por tanto, que en este punto la energía intrínseca no es cero. De hecho, la exigencia que un campo varíe suavemente crea toda una región interior a *D*, en donde la energía es mayor que cero. Este paquete de energía no puede desparramarse por el plano; está confinada por el bucle ("twist") en que la rotación neta del campo cambia en un giro.

Un solitón tridimensional es parecido en estructura, y su confinamiento puede explicarse por argumentos análogos. Los puntos de energía intrínseca mínima constituyen ahora la superficie de una esfera; la energía intrínseca aumenta tanto dentro como fuera de la esfera. Puede postularse de nuevo para todos los puntos exteriores a un cierto dominio una configuración del campo que corresponda a estos estados vacíos, pero ahora el dominio cierra un volumen esférico en vez de un área circular. El mismo argumento topológico muestra que el estado vacío no puede extenderse a todas las regiones interiores del dominio, y así debe haber una región en que el campo tenga un valor que dé una energía intrínseca mayor que cero. Esta pelota de energía es un solitón tridimensional, y guarda un estrecho parecido con una partícula elemental en el espacio ordinario.

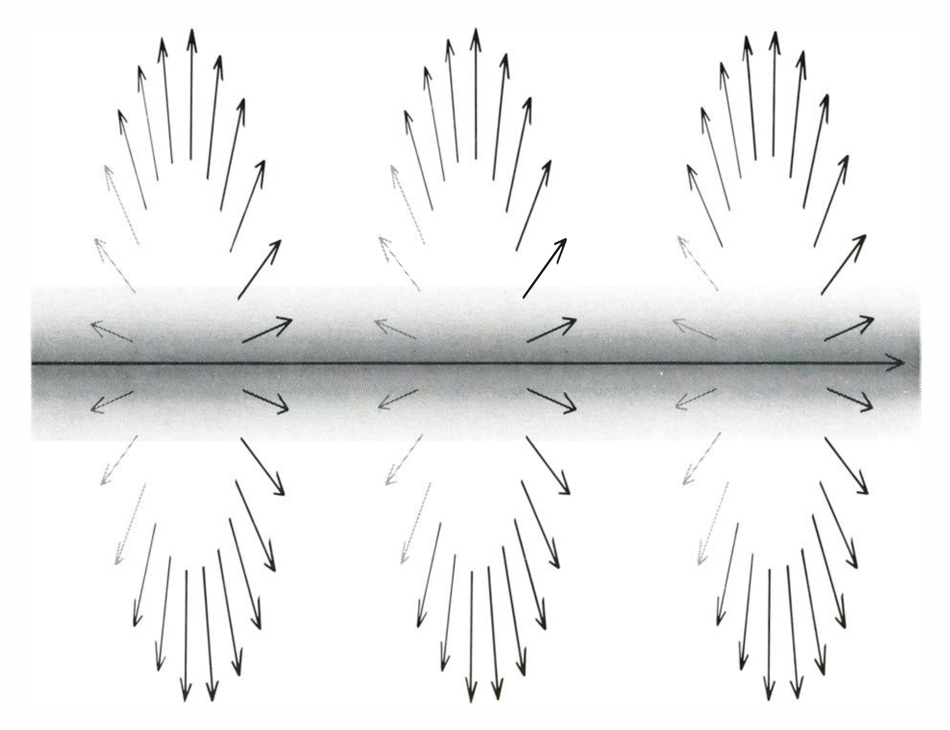
En el anterior análisis de solitones en dos o tres dimensiones, se ha olvidado un punto importante. La configuración del campo fuera del dominio *D* se ha definido como el estado vacío porque tiene energía intrínseca cero; pero no se ha tenido en cuenta su energía potencial. Puesto que el campo vectorial cambia de dirección en cada punto, la energía potencial no es cero. Puede demostrarse realmente que la energía potencial es infinita, de manera que la configuración del campo no sólo no puede describir una onda localizada, sino que además parece ser inaccesible.

Hay una salida a esta situación, pero no es sencilla. La energía potencial infinita de fuera del dominio *D* puede reducirse a cero postulando una nueva clase de campo, llamado campo de contraste o de aforo ("gauge"). En los últimos años los campos de "gauge" se han convertido en estructuras muy estudiadas, no sólo en física, sino también en matemáticas, donde se les conoce con un nombre diferente: conexiones. No analizaré los trabajos de los campos de "gauge" en detalle, sino que me concentraré en aquellas propiedades que son importantes en la teoría de los solitones.

A fin de eliminar la energía potencial del campo sin destruir a la vez el solitón, debe abolirse el cambio de orientación del vector al pasar de un punto a otro, al mismo tiempo que se mantiene la rotación total del campo en 360 grados. Aunque estas dos metas pueden parecer irreconciliables, se alcanzan las dos mediante un campo de gauge.

Al describir el campo bidimensional se supuso implícitamente que la dirección del vector se mediría en cada punto respecto a algún sistema fijo de ejes coordenados del plano abstracto en que se representan todos los posibles valores de $\vec{\varphi}$. El sistema de referencia podía ser arbitrario, pero se mantenía el mismo en todas partes: era un sistema global. La introducción de un campo de gauge permite que el sistema de referencia gire a medida que uno se mueve de unos puntos a otros. La energía potencial se calcula entonces midiendo la variación de $\vec{\varphi}$ no con respecto a un sistema de referencia global, sino con respecto a sistemas locales que pueden cambiar de un punto a otro.

Supongamos que, en algún punto del perímetro de *D*, el campo vectorial forma un ángulo de 30 grados respecto



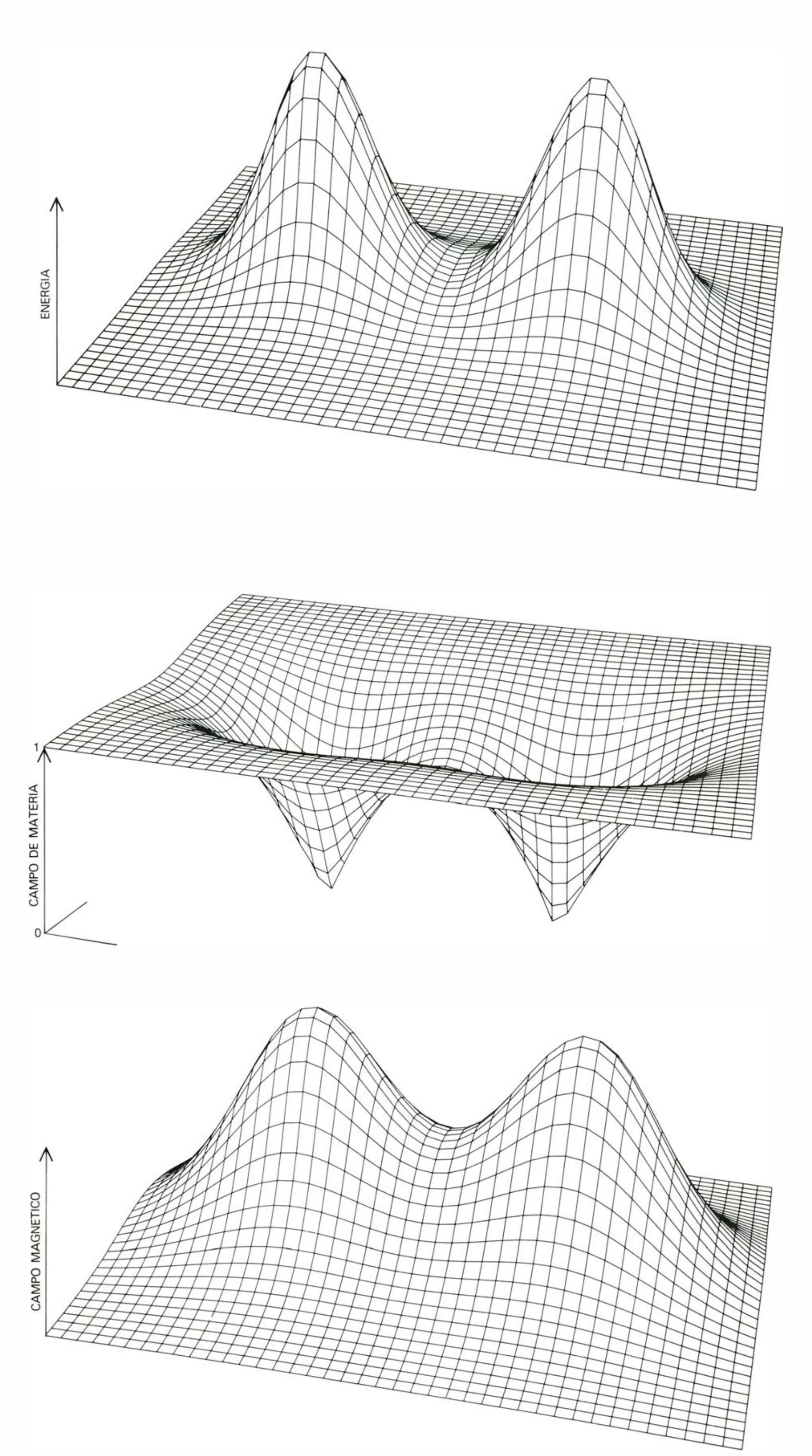
TUBO DE FLUJO MAGNETICO en un semiconductor; está confinado a una sección transversal pequeña por un campo que incorpora muchos solitones bidimensionales agrupados con simetría cilíndrica. Los pares de electrones superconductores vienen descritos por un campo vectorial que posee múltiples estados vacíos y que tiene una energía intrínseca que alcanza un mínimo cuando el módulo del campo es mayor que cero. El campo magnético está descrito por un campo de gauge. El bucle en la configuración topológica de los dos campos acota el flujo magnético y evita que se disipe en el espacio.

a un sistema de referencia elegido. Si el sistema es un sistema global, después de correr 90 grados a lo largo del círculo, el vector habrá alcanzado una nueva orientación de 120 grados. Sin embargo, un campo gauge conveniente permite que el sistema de referencia gire con el vector; independientemente de donde se haga la medida, la orientación del campo vectorial es en efecto constante, y así la energía potencial se anula. Por otro lado, la noción de un bucle en la configuración del campo no se altera: se ha transferido del campo $\vec{\varphi}$ al campo de gauge. Ahora es el sistema de referencia local el que sufre un giro completo a lo largo de una trayectoria cerrada en torno a D.

Importa resaltar que el campo de gauge no sólo especifica la orientación de muchos sistemas de referencia independientes. Antes bien, prescribe cómo cambia la orientación de un cierto referencial cuando se le desplaza. Si sólo fuese necesario medir las orientaciones cambiantes de un sistema de referencia en un espacio bidimensional, bastaría con especificar un número en cada punto: el ángulo de rotación. De hecho, un campo de gauge bidimensional se define mediante dos números en cada punto. Uno de los números indica cómo gira el sistema de referencia al hacer un desplazamiento según el eje x y cómo gira el otro al hacer un desplazamiento según el eje y.

Por ser el campo de gauge una prescripción para transportar un sistema de referencia, o referencial, entre puntos vecinos, y no una prescripción para establecer un referencial distinto en cada punto, la resultante de la rotación del sistema en un desplazamiento depende de la trayectoria seguida. Al ir de Roma a Londres vía Berlín, el referencial puede girar en un cierto ángulo. Si el sistema de referencia se lleva de Roma a Londres vía París, el ángulo de rotación en general diferirá bastante. Es más, en un circuito cerrado –digamos de Roma a Berlín, Londres, París y regreso a Roma– generalmente el sistema de referencia no volverá a su orientación original.

La noción de transportar el referencial sobre la superficie de la tierra no es del todo metafórica. Imaginemos que establecemos un sistema de referencia, consistente en dos ejes ortogonales, en algún punto del Ecuador. Transportemos luego el sistema de referencia al Polo Norte, llevándolo paralelo a sí mismo, primero dirigiéndolo al norte a lo largo de un meridiano, y luego siguiendo el Ecuador en una cierta distan-



COMBINACION DE DOS TUBOS DE FLUJO en un superconductor, a fin de ilustrar la coalescencia de dos solitones. El campo de materia, cuya magnitud está relacionada con la densidad de pares de electrones superconductores, se representa en el gráfico central; se trata del campo en que aparecen los solitones. El campo de materia tiene dos depresiones, en donde la densidad de pares de electrones se anula; en cualquier otra parte aumenta hacia un valor uniforme de 1. La energía del campo, mostrada en el gráfico superior, es cero en la periferia; sube hasta un máximo en cada punto en que la densidad de pares de electrones es cero. Así, las dos regiones en las que el campo de materia decrece representan cantidades confinadas de energía. En el gráfico inferior se muestra el campo magnético que pasa a través de los solitones; éste queda también confinado en las regiones de poca densidad de pares de electrones. Los gráficos fueron construidos con ayuda de un computador por el autor y L. Jacobs.

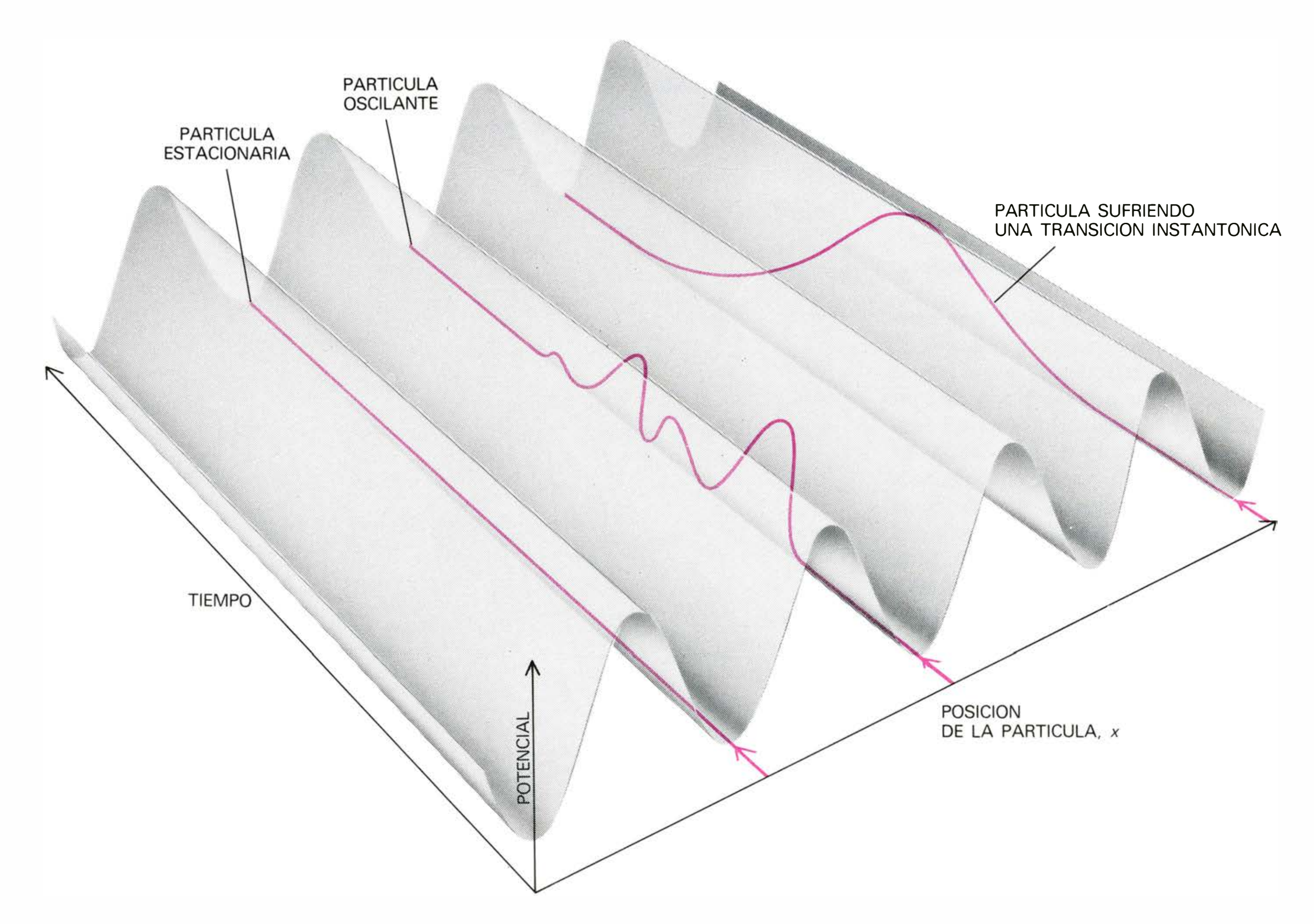
cia antes de torcer hacia el norte a lo largo de otro meridiano. Cuando los dos referenciales se encuentren de nuevo en el polo, sus orientaciones serán distintas. La discrepancia se debe a la curvatura de la tierra.

Hay configuraciones especiales de campos de gauge en los que un sistema de referencia transportado a lo largo de un circuito cerrado vuelve a su orientación inicial. En tales configuraciones, la rotación del referencial, o sistema de referencia, en un desplazamiento es independiente de la trayectoria seguida. Entonces se dice que el campo de gauge está en forma gauge pura. No lleva energía y se halla en su estado vacío. Cuando la orientación final del sistema de referencia depende del camino, el campo de gauge lleva energía, que es mayor cuando la dependencia en el camino se hace más pronunciada.

Podemos volver ahora a examinar la energía de un campo bidimensional que incluya un solitón. La introducción de un campo de gauge elimina la energía potencial del campo $\vec{\varphi}$ fuera del dominio *D*. Además, el propio campo de gauge está allí en una forma de gauge pura y no lleva energía, ya que el sistema de referencia vuelve a su orientación original después de cualquier bucle cerrado. Sin embargo, el campo de gauge no puede permanecer en una forma de gauge pura en el interior de *D*. El referencial gira 360 grados cuando recorre un bucle cerrado exterior a *D*, pero debe existir un bucle pequeño interior a *D* donde no gire en absoluto. Por extensión tiene que haber bucles de tamaño intermedio en los que el sistema de referencia gire un ángulo comprendido entre 360 y cero grados. En este caso, el sistema de referencia no vuelve a su orientación original después del circuito, de manera que el campo de gauge debe llevar energía.

El bucle en la configuración del campo exterior a *D* está ahora inmerso en el campo de gauge. Ambos campos, el campo $\vec{\varphi}$ y el campo de gauge, se encuentran en su estado vacío en el exterior de *D*, pero la continuidad de la configuración del campo exige que los campos lleven energía dentro del dominio. De nuevo, el solitón que emerge se hace estable a la dispersión debido a la topología de la configuración del campo.

El prototipo de campo de gauge es el que aparece en la teoría de Maxwell del electromagnetismo. Describe la orientación relativa de sistemas de referencia en un espacio abstracto de dos dimensiones. Las componentes de un campo vectorial $\vec{\varphi}$ están en este espacio. Este campo no es el propio campo electromagnético, sino que describe la materia cargada a la que se acopla el campo electromagnético. En las situaciones realistas, $\vec{\varphi}$ y el campo de gauge se definen ambos en todos los puntos del espacio tridimensional, aunque el espacio abs-



UN INSTANTON es un solitón confinado, no sólo en una región del espacio, sino también en un intervalo de tiempo. Se interpreta como una transición mecánico-cuántica entre dos estados de movimientos de una partícula. La partícula se mueve en un potencial unidimensional, o campo de fuerzas, y la evolución de su movimiento se registra en una superficie potencial que se extiende a lo largo del eje de tiempo. La historia de una partícula que permanece estacionaria en uno de los puntos de potencial mínimo se representa por una línea recta que sigue un valle de la superficie. Una partícula que oscila alrededor de un punto de equilibrio traza una curva ondulante en uno de los valles. La trayectoria de un instantón sube desde el fondo de un valle, cruza la cresta y vuelve al equilibrio estable en un valle adyacente. La trayectoria describe el movimiento de una partícula que desaparece en un punto de equilibrio y reaparece en otro. La transición es equivalente al fenómeno mecánico-cuántico del efecto túnel ("phenomenon of tunneling").

tracto a que pertenece $\vec{\varphi}$ es todavía de dos dimensiones, correspondiendo las dos dimensiones a los dos posibles signos de la carga.

En la mayoría de configuraciones del campo electromagnético, los solitones no son posibles debido a que el mínimo de la energía intrínseca corresponde a un valor cero del campo de materia $\vec{\varphi}$. Sin embargo, en los superconductores el mínimo se encuentra para un campo de magnitud no nula. La configuración del campo permite entonces la existencia de solitones bidimensionales, solitones que, de esta forma, aparecen en los materiales superconductores. Estos solitones se manifiestan como tubos de flujo magnético en los que los campos se disponen en una estructura de remolino y la energía está confinada en un estrecho tubo situado en el extremo del remolino. Cuando se mira la sección transversal de los remolinos, se parecen al solitón bidimensional descrito antes.

Un campo de gauge definido en un espacio abstracto de más de dos dimensiones es bastante más complicado que el campo electromagnético. La complejidad adicional surge en virtud de los muchos ejes existentes, a cuyo alrededor puede girar el sistema de referencia; en general, el resultado de rotaciones realizadas alrededor de diferentes ejes depende del orden en que se realicen. Esta clase de campos de gauge se llaman campos de Yang-Mills, en honor de C. N. Yang de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, y Robert L. Mills, de la Universidad estatal de Ohio, quienes los examinaron por primera vez en 1954. Fue algún tiempo antes de que se establecieran las técnicas matemáticas necesarias para tratar los campos; pero actualmente los campos de Yang-Mills han tenido un papel crucial en la descripción física de la naturaleza. Un campo de Yang-Mills es el elemento esencial en una teoría que parece unificar dos de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza: la fuerza débil y la electromagnética. Otra teoría de Yang-Mills, aunque está menos desarrollada, quizá pueda explicar una tercera fuerza fundamental, la fuerza nuclear o fuerte.

El descubrimiento de que los solitones pueden generarse en una teoría que describe un campo de materia acoplado a un campo de Yang-Mills fue realizado independientemente por Gerhard't Hooft, de la Universidad de Utrecht, y por Alexander M. Polyakov, del Instituto Landau de física teórica de Moscú. Descubrieron el solitón tridimensional al ver que la teoría puede tener múltiples estados vacíos con una topología no trivial. Es un solitón de esta clase el que puede existir como una partícula elemental real. Tal partícula solitón sería muy pesada y sería un monopolo magnético, es decir, llevaría una carga magnética aislada. Esta propiedad, no presentada por ninguna de las partículas conocidas, se debe también a la topología del campo; de la misma manera que la disposición en bucle de vacíos confina la energía, encierra asimismo una unidad de campo magnético.

Aunque la exploración teórica de las propiedades de estas partículas sólo acaba de empezar, ya se han encontrado algunos hechos interesantes. Uno de éstos concierne a las relaciones entre dos categorías fundamentales de partículas, los fermiones y los bosones. Estas categorías se distinguen por el momento angular intrínseco, o spin, de las partículas, y por su estadística o comportamiento en grupos. El spin de un fermión es un semientero y el spin de un bosón es un entero. La estadística mecánico-cuántica de la partículas especifica que dos fermiones no pueden ocupar el mismo estado, mientras que los bosones pueden agruparse en número ilimitado. Dos fermiones pueden combinarse para formar una partícula compuesta con las propiedades de un bosón, igual que dos semienteros se suman para dar un entero. Podría parecer, sin embargo, que no hay ninguna manera de combinar bosones para dar un fermión.

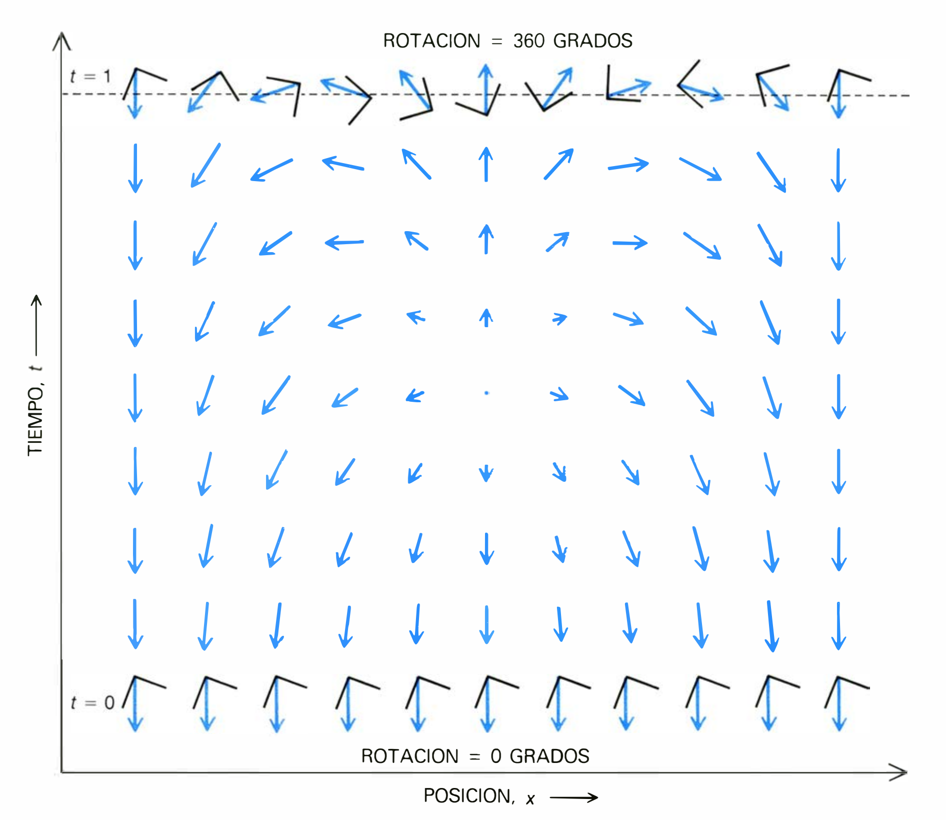
Cuando el campo sólo tiene un vacío global, la prohibición de formar fermiones a partir de bosones es tajantemente absoluta, pero no lo es en presencia de solitones. Recientemente, 't Hooft y Peter Hasenfratz, quien está ahora en la Universidad de Budapest, y, de un modo independiente, Roman W. Jackiw, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y yo hemos encontrado un mecanismo para dicha conversión. En presencia de un solitón puede surgir un sistema de spin semientero de un campo cuyos únicos componentes sean bosones. Alfred S. Goldhaber, de Stony Brook, ha demostrado que el sistema tendría no sólo el spin característico de un fermión, sino también su estadística.

Otro resultado nuevo, obtenido por Jackiw y por mí mismo, muestra que un fermión puede dividirse en dos bajo la influencia de un solitón. Descubrimos un modo de interacción entre solitones y fermiones en el que la estructura del solitón queda modificada por el campo del fermión. El solitón existe en dos estados de energía idéntica, un estado con el carácter de medio fermión y el otro con el de medio antifermión.

Las perspectivas para formar y detectar partículas solitones en el laboratorio son bastante inciertas. Dependen en gran medida de cuál sea la teoría que se encuentre finalmente para describir con la máxima precisión las interacciones entre las partículas elementales. Si la teoría es tal que admite soluciones solitónicas, entonces es opinión generalizada que aparecerán solitones en la naturaleza. Sin embargo, hay muchas teorías propuestas; algunas incorporan ecuaciones de campo con una topología adecuada para solitones, pero otras no. No es sorprendente que las partículas solitones no se hayan observado aún en los experimentos hechos con aceleradores de partículas. La masa de una tal partícula, medida en unidades de energía, se cree que sería de algunos billones de electronvolt. Un billón de electronvolt es aproximadamente 1000 veces la masa de un protón y más de cuatro veces la masa de un átomo de uranio. Habrán de pasar varios años antes de que los aceleradores puedan producir partículas tan pesadas.

Todos los solitones descritos antes son estructuras que están localizadas en el espacio. Su interés estriba en que están confinados permanentemente en una región definida del espacio. En los últimos años, se ha descubierto otra clase de solitón, que se halla confinado en una pequeña región del espacio y del tiempo. Se trata de un fenómeno que existe sólo en un cierto lugar y en un cierto instante. Esta nueva clase de solitón, al que se ha dado el nombre de instantón, no se interpreta como un objeto sino como un suceso; no como una partícula, sino como una transición mecánico-cuántica entre varios estados de otras partículas.

La naturaleza de un instantón puede profundizarse examinando el movimiento de una partícula bajo la influencia de un potencial, que especifica el valor de una fuerza que actúa sobre la partícula. Para mayor sencillez, el potencial puede considerarse unidimensional, y para que aparezcan instantones debe tomarse periódico, es decir, tienen que darse varios puntos equivalentes, pero distintos, de mínima energía. Hay muchos ejemplos de tales potenciales en la naturaleza: uno corriente es unas montañas rusas en que el potencial es el campo gravitacional de la tierra y se encuentra un punto de energía potencial mínima en el fondo de cada valle. Hemos de advertir que, en este sistema,



EVOLUCION DE UN CAMPO durante una transición instantónica. Dicha evolución muestra un bucle topológico muy parecido al de un solitón puramente espacial. Inicialmente ($t = 0$), el campo es uniforme, formado por vectores que son paralelos y de magnitud unidad. Se supone que esta configuración describe un estado vacío. En un momento posterior ($t = 1$), los vectores de nuevo tienen módulo unidad pero han girado una vuelta. Si el sistema de referencia se define por un campo de gauge apropiado, la última configuración puede considerarse también como un estado vacío. Sin embargo, para que el campo evolucione desde el primer estado al segundo, su rotación neta debe cambiar de cero a 360 grados, una transición que sólo es topológicamente posible si el campo vectorial en algún sitio decrece hasta cero. En un tal punto, la energía intrínseca del campo es mayor que cero, y así el instantón describe una evolución de un estado vacío a otro pasando por un estado de energía finita.

la energía potencial no es la del campo sino la de la partícula en el campo. En el ejemplo de las montañas rusas, la energía potencial es proporcional a la altura respecto al punto más bajo del valle.

La representación de un potencial periódico sencillo muestra una línea recta, que señala el espacio en que se mueve la partícula, y una línea ondulada (quizás una curva sinusoidal), que da el valor del potencial en cada punto del espacio unidimensional. A fin de representar la evolución del sistema debe añadirse al gráfico otro eje que designe el tiempo. La línea ondulada se convierte entonces en una superficie ondulada. El moverse perpendicularmente a las ondulaciones equivale a un cambio en la posición; el moverse paralelo a ellas no es un movimiento en el espacio, sino que representa un estado estacionario del sistema en instantes sucesivos.

Una partícula en un estado de mínima energía permanece en el fondo de un pozo de la curva del potencial, y puede esperarse que permanezca en reposo allí para siempre. La trayectoria de la partícula en el tiempo es, por tanto, una línea recta que sigue el fondo del valle. Una partícula puede oscilar también alrededor del punto de equilibrio del fondo de un pozo, un movimiento que se representa lo largo del eje de tiempo mediante una línea sinuosa que va de un lado del valle al otro.

El suceso de mayor interés es el movimiento de una partícula desde una posición estable en el fondo de un pozo, por encima de la barrera del potencial, hasta un pozo adyacente. En el eje del tiempo, esta evolución corresponde a una línea que empieza en un valle de la superficie potencial, sube por encima de la cresta y baja al valle inmediato. En un momento, la partícula se halla estacionaria en un punto de energía mínima; en el instante siguiente, se encuentra también en reposo, pero en otra posición de energía mínima. A la transición entre estos estados llamamos instantón.

En la física clásica que precedió al desarrollo de la mecánica cuántica, tal transición era imposible. Si un vagón de montañas rusas está en reposo en el fondo de una ondulación, puede predecirse con seguridad que no subirá espontáneamente la pendiente de la colina y se parará en el valle siguiente. La energía se conservaría en este proceso imaginario –al menos en unas montañas rusas ideales, sin rozamiento– porque toda la energía que se tendría que gastar para subir el vagón hasta la cima de la colina se recuperaría en la bajada. La transición está prohibida a pesar de todo, porque en física clásica la energía debe conservarse en todo momento, no sólo en el balance final.

La mecánica cuántica proporciona un tipo de financiamiento del déficit que hace posible la transición instantónica. Una aparente violación de la ley de conservación está permitida siempre que la violación no dure demasiado y que los libros cuadren al final. A través de este mecanismo, que se llama efecto túnel ("tunnelling"), una partícula puede cruzar una barrera de potencial, aun cuando tenga una energía mucho menor que la necesaria para superar la barrera. El instantón es una estructura de la teoría clásica de campos que describe este proceso fundamentalmente mecánico-cuántico.

La representación gráfica de un instantón es geométricamente idéntica a la representación de un solitón en el campo de "sine-Gordon"; sólo cambian los nombres de los ejes. De hecho, los instantones se encontraron primeramente como solitones ordinarios en una teoría de campos de cuatro dimensiones espaciales. El descubrimiento fue hecho por A. A. Belavin, Polyakov, A. S. Schwartz y Yu. S. Tyupkin, del Instituto Landau, quienes interpretaron correctamente el solitón, no como un objeto cuatridimensional, sino como una evolución de campos en tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal. También demostraron que los instantones deben aparecer en una gran clase de teorías de campos, que incluyen las teorías más corrientemente aplicadas a las interacciones de las partículas elementales.

Muy pronto, el significado de los instantones en la estructura del vacío mecánico-cuántico fue analizado por 't Hooft, Curtis G. Callan, Jr., y David J. Groos, de la Universidad de Princeton, y Roger F. Dashen, del Institute for Advanced Study, y por Jackiw y yo. (Incidentalmente, fue 't Hooft quien sugirió el nombre instantón). La existencia de instantones implica que el estado vacío en mecánica cuántica no es único sino que tiene una estructura periódica, casi como los valles del potencial del campo electromagnético interior a la red de átomos de un cristal. Desde luego, el campo periódico en un cristal se debe a la disposición ordenada de los núcleos atómi-

cos, mientras que el esquema generado por las soluciones instantónicas constituyen una estructura intrínseca del espacio-tiempo. El descubrimiento de la estructura resultó bastante inesperado.

Aunque los instantones son una innovación reciente en teoría de campos, han conducido ya a la resolución de un problema preocupante de la física de las partículas subnucleares. El problema concierne a la masa de las partículas llamadas mesones, que se cree que son objetos compuestos, formados por otros entes más fundamentales denominados quarks. Cada mesón consta de un quark y un antiquark, mantenidos juntos por un campo de gauge. Dos de las clases de quarks (llamados u y d) y sus correspondientes antiquarks ($\bar{u}$ y $\bar{d}$) se cree que son comparativamente ligeros. Como hay cuatro maneras de hacer un par quark-antiquark a partir de estos objetos ($u\bar{u}$, $u\bar{d}$, $d\bar{u}$, $d\bar{d}$) parece que debería haber cuatro mesones de masa comparativamente baja. Tres de tales mesones son conocidos desde hace muchos años; se trata de los mesones pi o piones positivos, negativos y neutros, que tienen masas equivalentes a una energía de unos 140 millones de electronvolt. El cuarto mesón ligero, que parece ser una predicción ineludible de la teoría, no se ha encontrado todavía.

Sin embargo hay otra partícula que puede hacer su papel. Es el mesón eta, y tiene todas las propiedades adecuadas excepto una: su masa es de unos 550 millones de electronvolt. La introducción de los instantones ha explicado ahora la anomalía de la masa del mesón eta. Los instantones aparecen como excitaciones, localizadas en el espacio y el tiempo, en el campo de gauge que liga los quarks entre sí. Alteran la distribución de masa entre los mesones porque tienen efectos distintos en las diferentes combinaciones de quarks. Hablando groseramente, un instantón es transparente para un pion, pero actúa como un obstáculo en la propagación de un mesón eta, y por tanto aumenta su masa inerte efectiva.

Los solitones y los instantones son la novedad de las teorías de campos, que puede ser prohibitivamente compleja aunque tenga una estructura matemática rica y elegante. De hecho, los físicos que investigan en solitones han descubierto que los matemáticos han estado estudiando objetos equivalentes durante muchos años por un exclusivo interés geométrico. El análisis matemático y la intuición física han creado herramientas muy potentes para aclarar la naturaleza y las propiedades del solitón.

Origen del campo magnético terrestre

Se debe a una dinamo que funciona a base de un flujo de materia en el núcleo terrestre. Pero, ¿qué es lo que impulsa dicho flujo? Quizá la energía gravitatoria liberada por materiales pesados que se dirigen hacia el centro de la Tierra

Charles R. Carrigan y David Gubbins

Desde el año 1600 se sabe que la Tierra se comporta como un imán, pero todavía no se ha identificado plenamente la causa de dicho campo magnético. Esta no puede consistir en la existencia de minerales con imanación permanente, pues la mayor parte del planeta está demasiado caliente para que los materiales magnéticos puedan conservar su magnetismo. Además, si se tratara de minerales con imanación permanente, no podrían moverse con rapidez suficiente para permitir explicar los conocidos cambios a largo plazo de la intensidad, dirección y características del campo magnético terrestre. El análisis de las ondas ligadas a los terremotos indica que, por lo menos, una parte del núcleo terrestre es fluido, y está ampliamente aceptada la idea de que el lento fluir de la materia en el núcleo produce corrientes eléctricas, las cuales inducen a su vez el campo magnético.

Sin embargo, son temas controvertidos: la forma cómo se mueve el fluido metálico del núcleo, cuál es la fuente de energía que impulsa dicho movimiento y cómo este movimiento origina el campo magnético. No puede estudiarse de una manera directa el núcleo terrestre, ni sus altas temperaturas y presiones pueden reproducirse fácilmente en el laboratorio. Por todo ello, las preguntas señaladas son difíciles de contestar. Sin embargo, las cuestiones empiezan a aclararse como fruto de una combinación de innovaciones teóricas y experimentales. Parece que los movimientos del núcleo fluido pueden ser alimentados con la energía gravitatoria liberada al emigrar hacia el centro del núcleo los materiales densos a la vez que los ligeros van hacia fuera.

Se conocen pocas cosas de una manera segura acerca del núcleo terrestre y su campo magnético. Los datos sismológicos indican que el núcleo está formado por una gigantesca esfera metálica de tamaño aproximadamente igual al del planeta Marte. En condiciones normales, el núcleo fluido conduce el calor y la electricidad de forma mucho mejor que el cobre, y probablemente tiene una viscosidad cercana a la del agua. Con un radio medio de 3485 kilómetros, el núcleo constituye cerca de la sexta parte del volumen de la Tierra y alrededor de un tercio de su masa. La densidad del núcleo es variable. El valor mínimo se da cerca de su borde, y equivale a nueve veces la densidad del agua. El máximo se da en la parte central, y es igual a 12 veces la densidad del agua. Las estimas de densidad combinadas con hipótesis acerca del origen del sistema solar sugieren que el núcleo está formado en su mayor parte por hierro y níquel con vestigios de elementos más ligeros, tales como el cobre, el azufre y el oxígeno.

En el centro del núcleo hay un núcleo interno cuyas propiedades sísmicas son algo distintas de las propiedades de la región que le rodea. El núcleo interno tiene un radio de 1220 kilómetros, lo que corresponde a unos dos tercios del tamaño lunar y, a diferencia del resto del núcleo, tiene una constitución probablemente sólida. Las presiones en el centro alcanzan valores de millones de atmósferas; y a estas presiones el punto de fusión del hierro está comprendido entre 3000 y 5000 grados Kelvin.

El modo más simple de adquirir una idea acerca de la intensidad y dirección del campo magnético terrestre consiste en estudiar el comportamiento de la brújula. La intensidad del campo, medida mediante la fuerza necesaria para separar la brújula de su posición de equilibrio, es extremadamente pequeña. Su valor máximo importa 0,3 gauss, y se da tanto cerca del polo Norte como del polo Sur. Es varios centenares de veces más débil que el campo entre los polos de un imán de juguete en forma de herradura. La brújula tiende a orientarse en la dirección norte-sur, pero en pocos lugares de la Tierra señala de una manera precisa el norte geográfico. Este coincide exactamente con uno de los extremos del eje de rotación terrestre. La dirección señalada por la brújula varía esporádicamente al pasar de unos lugares a otros, por lo que hay que considerar que el campo está formado por remolinos irregulares.

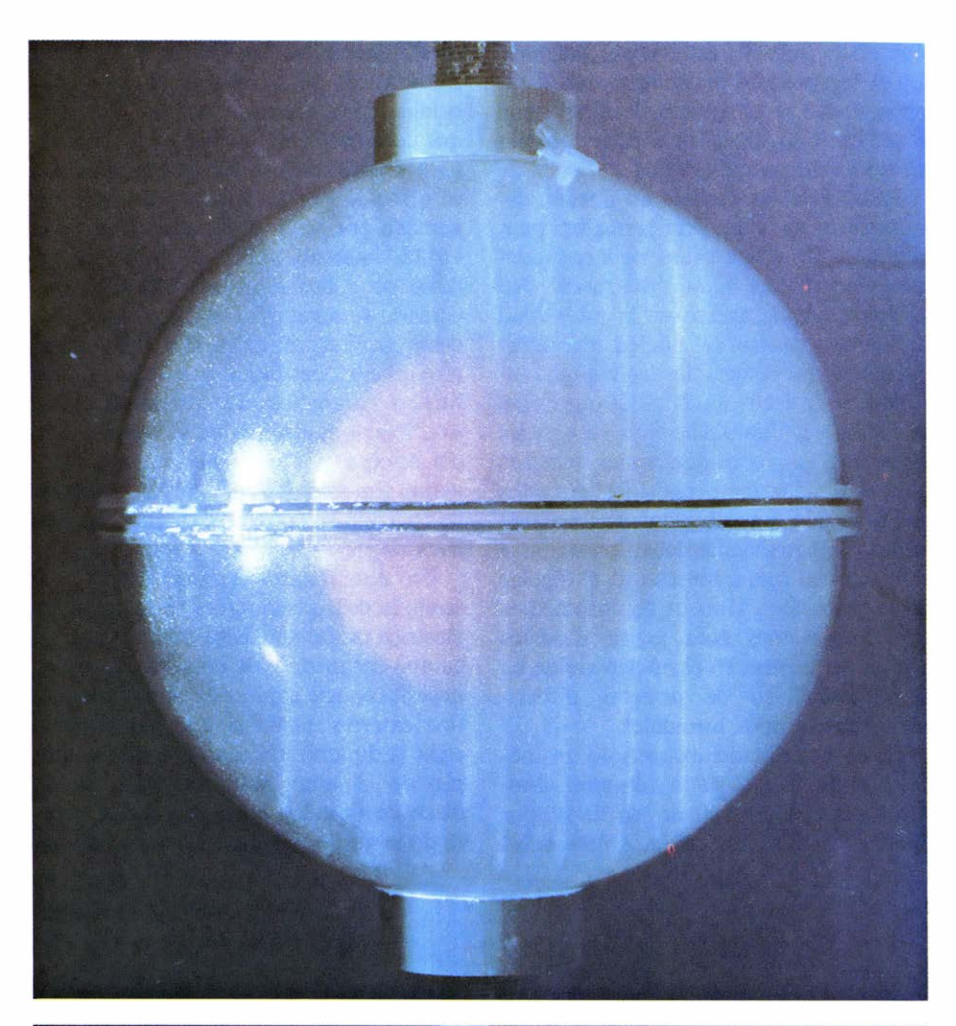
El alineamiento en general Norte-Sur de las líneas magnéticas, de acuerdo con el eje de rotación terrestre, sugiere que el campo en lo fundamental constituye un dipolo. Es el campo que sería creado por un conductor eléctrico en forma de espira, situado en el plano del Ecuador. El campo resulta inclinado unos 11 grados respecto el eje de rotación terrestre, y no corresponde al campo de un dipolo perfecto. No puede proceder del campo magnético de la Tierra primitiva, pues la conductividad eléctrica del núcleo terrestre es demasiado baja para ello. Sin un aporte continuo de energía, las corrientes eléctricas que mantienen el campo hubieran desaparecido en un tiempo inferior a 10.000 años. El campo, por el contrario, ha existido claramente desde mucho antes.

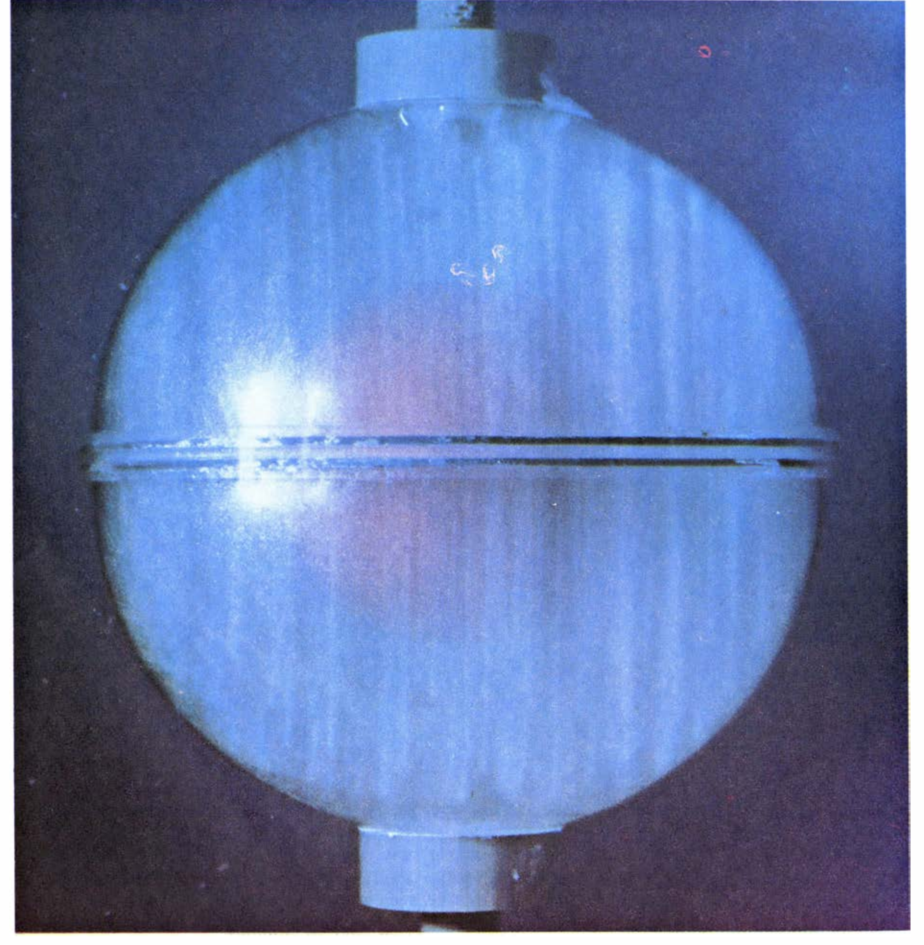
Desde el siglo XVII se vienen trazando mapas que indican la dirección y la fuerza del campo magnético en los distintos puntos de la superficie terrestre para ser empleados en la navegación marítima. Tales mapas nos ofrecen un registro detallado de las variaciones seculares (a largo plazo) experimentadas por el campo desde hace cuatro siglos. Revelan dos características fundamentales. Primero, un lento descenso, aunque incesante, del principal campo dipolar a un ritmo tal que, si continuara, el campo se desvanecería en 3000 años.

Segundo, una lenta traslación hacia el Oeste de los remolinos irregulares del campo, que importa un grado de longitud cada cinco años. Tal traslación sugiere que el fluido del núcleo se mueve a una velocidad de un milímetro por segundo, o sea, algo menos de 90 metros por día.

Las rocas de la corteza terrestre también nos ofrecen información acerca del campo magnético. Sirven como registro de cómo han evolucionado tanto la fuerza como la dirección a lo largo de las eras geológicas. En los experimentos paleomagnéticos se mide la edad de las rocas y su imanación permanente. A partir de estas medidas pueden asignarse fechas a las características del campo, pues éste ocasionó un alineamiento permanente de los dominios magnéticos dentro de las rocas en el momento de su formación. Tales experimentos indican que la Tierra ha poseído un campo magnético significativo, por lo menos, durante 2700 millones de años, lo que supone una fracción sustancial de toda su existencia, que se estima en 4600 millones de años. Durante todo este tiempo, el campo ha ido fluctuando en magnitud y ha invertido su dirección aproximadamente cada millón de años.

Cualquier hipótesis acerca del origen del campo debe dar cuenta del carácter eminentemente dipolar de éste, de su lenta disminución de intensidad, de su deriva hacia el Oeste y de la inversión polar. Es difícil conseguir una hipótesis razonable pues los 3000 kilómetros de materia que separan la superficie terrestre del núcleo de la Tierra enmascaran las características del campo en el lugar de su origen en el interior de la Tierra. Cerca del núcleo, el campo probablemente es unas diez veces más intenso





ESFERA PLASTICA GIRATORIA. Consta de una pequeña esfera sólida *(color rosado)* rodeada de agua. Constituye un modelo de los posibles movimientos fluidos en el núcleo de la Tierra, que originan el campo magnético terrestre. Con objeto de producir fuerzas de empuje se aplica una diferencia de temperatura de un grado Kelvin entre la esfera interior y la exterior. Cuando las fuerzas de empuje alcanzan intensidad suficiente para impulsar el fluido, en contra de las fuerzas retardadoras que proceden de la viscosidad, los movimientos consisten en circulaciones de pequeña escala altamente ordenadas. Toman forma de rodillos largos que giran lentamente y que están alineados paralelamente al eje de rotación de la esfera *(arriba)*. Si se aumenta la diferencia de temperatura, las fuerzas de empuje alcanzan un valor suficiente para impulsar circulaciones en toda la masa fluida *(abajo)*, en vez de limitarse a una delgada capa adyacente a la esfera interior *(arriba)*. Se han añadido laminillas microscópicas para hacer visibles las circulaciones en estas fotografías. El modelo original fue construido por Friedrich H. Busse y uno de los autores (Carrigan) en la Universidad de California en Los Angeles.

que en la superficie terrestre. Además, allí el campo debe ser mucho más complicado que la estructura de dipolo que presenta en la superficie y debe cambiar de una manera más rápida.

Estos cambios rápidos no pueden detectarse en la superficie terrestre, pues resultan filtrados a causa de la conducción eléctrica del manto intermedio. No se conoce nada acerca de la intensidad del campo dentro del núcleo. En particular, no son detectables los campos toroidales: es decir, aquellos cuyas líneas de fuerza sean paralelas a las superficies esféricas. Las consideraciones teóricas indican que los campos toroidales, de los cuales el tipo más simple tiene forma de anillo, probablemente deben presentarse y ser mucho más intensos que el dipolar de la superficie. Uno de los obstáculos más importantes para lograr modelos acerca del campo en el núcleo reside en la imposibilidad de detectar directamente los campos toroidales.

En la actualidad subsiste sólo un modelo de núcleo: el de la "dinamo automantenida", desarrollado en 1950 por Walter M. Elsasser, de la Universidad de California en San Diego, y por E.C. Bullard, de la Universidad de Cambridge. Una dinamo es una máquina que convierte energía mecánica en energía eléctrica, uno de cuyos ejemplos nos es ofrecido por la dinamo de disco inventada por Michael Faraday. Puso una varilla imanada junto al borde de un disco de cobre montado sobre un eje. Cuando se hace girar el disco, nace una débil corriente eléctrica motivada por el movimiento del disco en el seno de un campo magnético. La corriente ejerce una fuerza que se opone al movimiento del disco y por ello éste tiende a detenerse. En resumen, la energía mecánica de rotación se convierte en energía eléctrica.

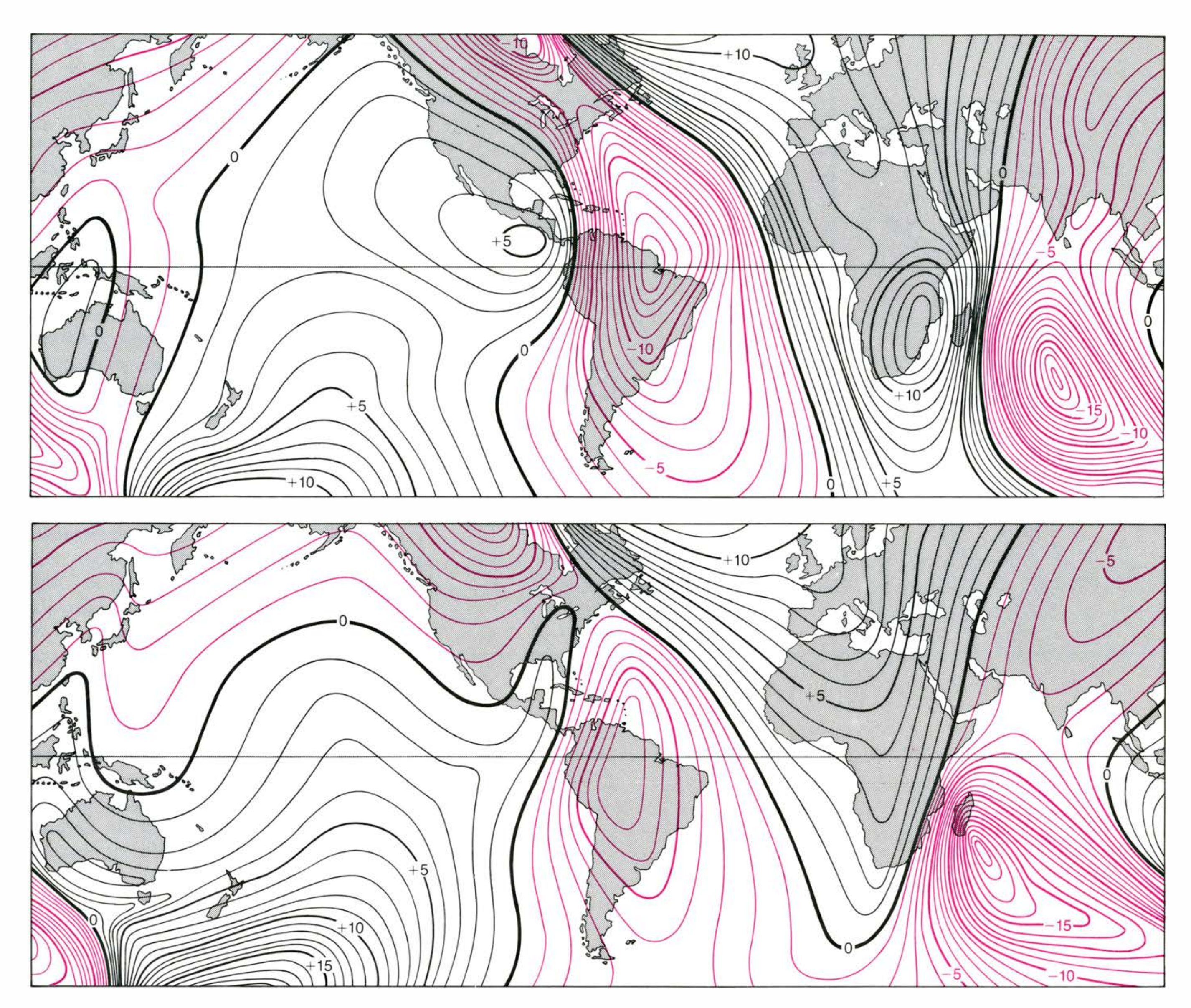
En una dinamo automantenida, tal como la del núcleo terrestre, la corriente eléctrica producida sirve para reforzar el campo magnético, de manera que no se necesita aporte alguno de campo magnético externo, salvo el que inicialmente ceba la dinamo. Ofrece un ejemplo simple de dinamo automantenida la de disco de Faraday en la que se ha sustituido la varilla imanada por una bobina. Si por ésta circula una corriente eléctrica, puede establecerse un campo magnético idéntico al creado por la varilla imanada. Por tanto, la bobina induce en el disco una corriente análoga a la originada por la varilla imanada. Si la corriente inducida en el disco se hace pasar por la bobina, se mantendrá el campo magnético con tal que el disco no cese de girar.

La dinamo terrestre es automantenida. Después de haber sido puesta en funcionamiento mediante un campo magnético que pudo haber sido muy pequeño, la dinamo produce su propio campo sin necesidad de aporte externo de magnetismo. Tal dinamo pudo haber sido activada inicialmente mediante el débil campo magnético que atraviesa toda nuestra galaxia. El mecanismo de la dinamo una vez puesto en juego genera un campo mucho más intenso. Aunque el líquido metálico del núcleo terrestre no se parece a un disco sólido, puede fluir de tal manera que actúe del mismo modo que una dinamo mecánica.

La cuestión crucial consiste en averiguar cómo fluye el núcleo líquido para actuar a modo de dinamo. Aunque no requiere un suministro incesante de campo magnético, sí necesita un aporte constante de energía mecánica para mantener en movimiento el material conductor. En el caso del núcleo terrestre, esto quiere decir que no sólo el líquido metálico debe fluir de una manera apropiada sino que, además, alguna fuente de energía debe mantener el movimiento.

Vamos a considerar en detalle un posible mecanismo mediante el cual se genera el campo magnético. Alguna forma de convección inicialmente agita el núcleo fluido y éste se mueve a la manera de una dinamo a causa de las fuerzas debidas a la gravedad, al magnetismo y a la rotación. Es seguro que esta última debe jugar un papel fundamental en el origen de los campos magnéticos, ya que no sólo la Tierra sino también los otros planetas, el Sol y otras estrellas que giran muestran campos magnéticos alineados o ligados a sus ejes de rotación. La conexión entre magnetismo y rotación es tan acusada que, a principios de siglo, muchos físicos, incluido Albert Einstein, pensaban en una ley física nueva con arreglo a la cual toda masa que gire debía ocasionar un campo magnético. Finalmente, en 1950 se dejó de hablar de tal ley a raíz de dos experimentos cruciales. P.M.S. Blackett, del Imperial College of Science and Techno-

NUCLEO TERRESTRE, cuyo radio mide 3485 kilómetros. Todo el núcleo constituye cerca de la sexta parte del volumen de la Tierra y aproximadamente la tercera parte de la masa de la misma. En el centro del núcleo se distingue un núcleo interno sólido cuyo radio es de 1220 kilómetros. El flujo de materia en el llamado núcleo exterior produce corrientes eléctricas que, a su vez, pueden engendrar el campo magnético de la Tierra. Las líneas que aparecen en negro representan las líneas de fuerza.

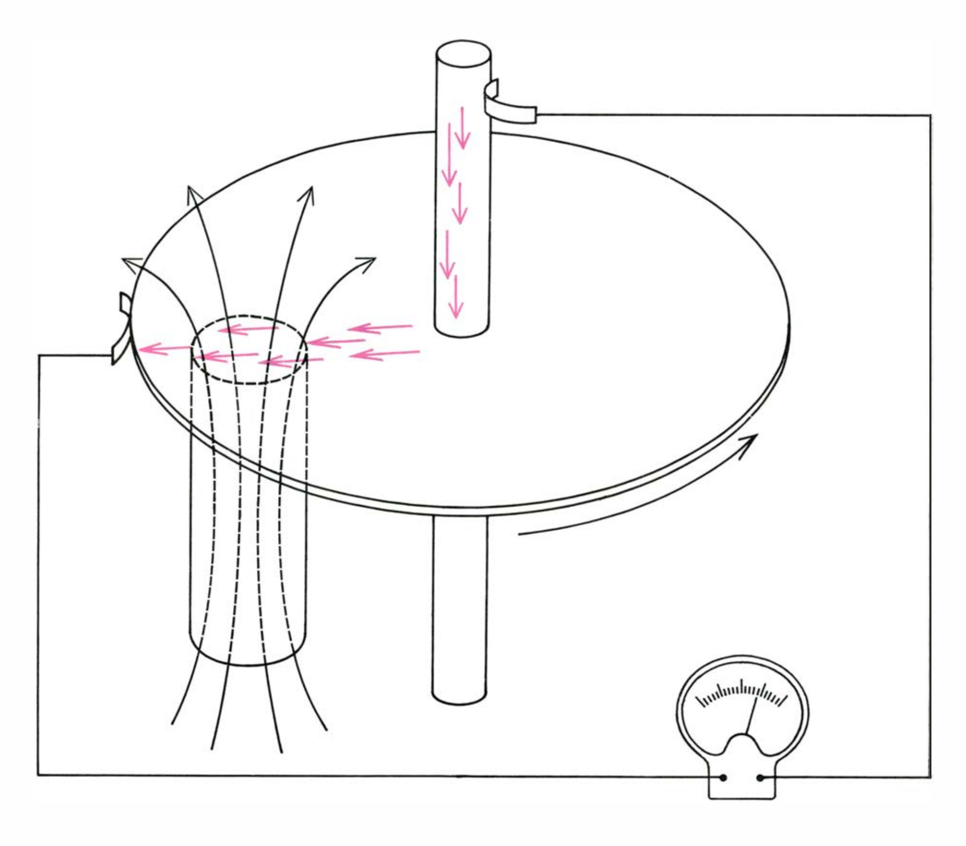


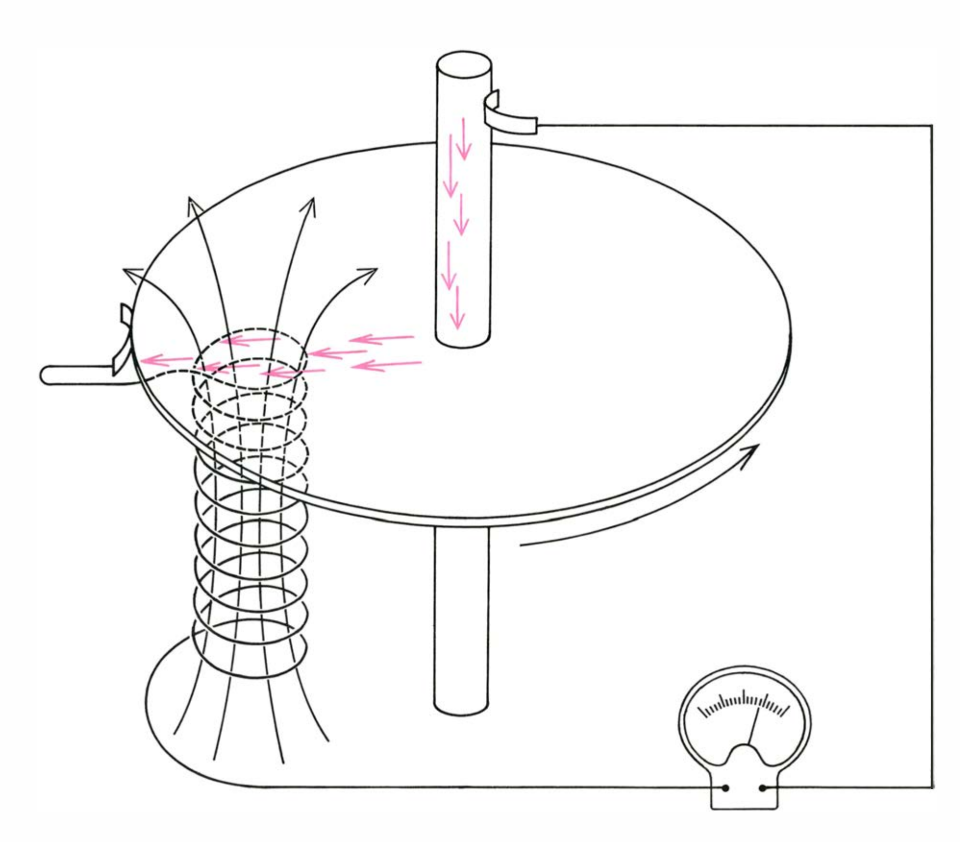
VARIACIONES SECULARES, es decir, remolinos variables a largo plazo, que se presentan en el campo magnético terrestre. Dichas variaciones seculares se han indicado mediante las diferencias que existen en las isolíneas trazadas sobre los dos mapas del mundo. Las isolíneas corresponden al cambio en minutos de arco por año experimentado por la desviación que muestra la brújula respecto al norte geográfico. El mapa superior reproduce las isolíneas en 1912 y el mapa inferior corresponde a 1942. Una isolínea que lleva un número positivo *(en negro)* indica el ritmo con el cual la brújula se va separando del meridiano. Una isolínea con número negativo *(en color)* da el ritmo con el cual la brújula se acerca al meridiano. Así, en la Isla del Norte de Nueva Zelanda en 1942 una brújula se separaba del meridiano con una velocidad de cinco minutos de arco (+ 5) por año.

logy, fracasó en su intento de encontrar el campo magnético que debía producir un cilindro de oro puesto en rotación. Asimismo, S.K. Runcorn, de la Universidad de Cambridge, midió la intensidad del campo magnético terrestre a diferentes profundidades en el pozo de una mina y no encontró los valores característicos que predecía la ley mencionada.

En la actualidad parece bastante seguro que la rotación está ligada al origen del campo terrestre a través de la fuerza de Coriolis que la rotación ejerce sobre el núcleo fluido. La fuerza de Coriolis actúa sobre cualquier masa que se esté moviendo respecto a unos ejes de referencia que giren. La masa es acelerada en una dirección perpendicular a la de su movimiento. En la atmósfera y en los océanos, la fuerza de Coriolis es responsable de los movimientos ciclónicos en gran escala del aire y de las corrientes marinas. Sin embargo, la fuerza de Coriolis puede cambiar tan sólo la dirección de las corrientes. Actúa perpendicularmente a la dirección del flujo y por tanto no puede impulsarlas en contra de los efectos retardadores ocasionados por otras fuerzas.

Según parece, es el empuje gravitatorio la fuerza que ocasiona realmente el movimiento. En un fluido, las partes menos densas tienden a flotar, es decir, a moverse convectivamente hacia arriba. El empuje gravitatorio es la fuerza que mueve las corrientes atmosféricas, las corrientes oceánicas y también los continentes. Esta fuerza puede originar movimientos radiales del fluido, cuya presencia es requerida por las consideraciones teóricas del campo magnético terrestre. Las fuerzas de empuje responsables de la convección dependen de las diferencias de densidad, que pueden deberse a variaciones en la temperatura y composición del fluido. La convección tiende a redistribuir el material en el fluido de modo que desaparezca el empuje. Para que el fluido continúe circulando, ha de persistir el empuje; éste puede mantenerse por un aporte continuo de calor, o bien por una constante adición de material menos denso. En





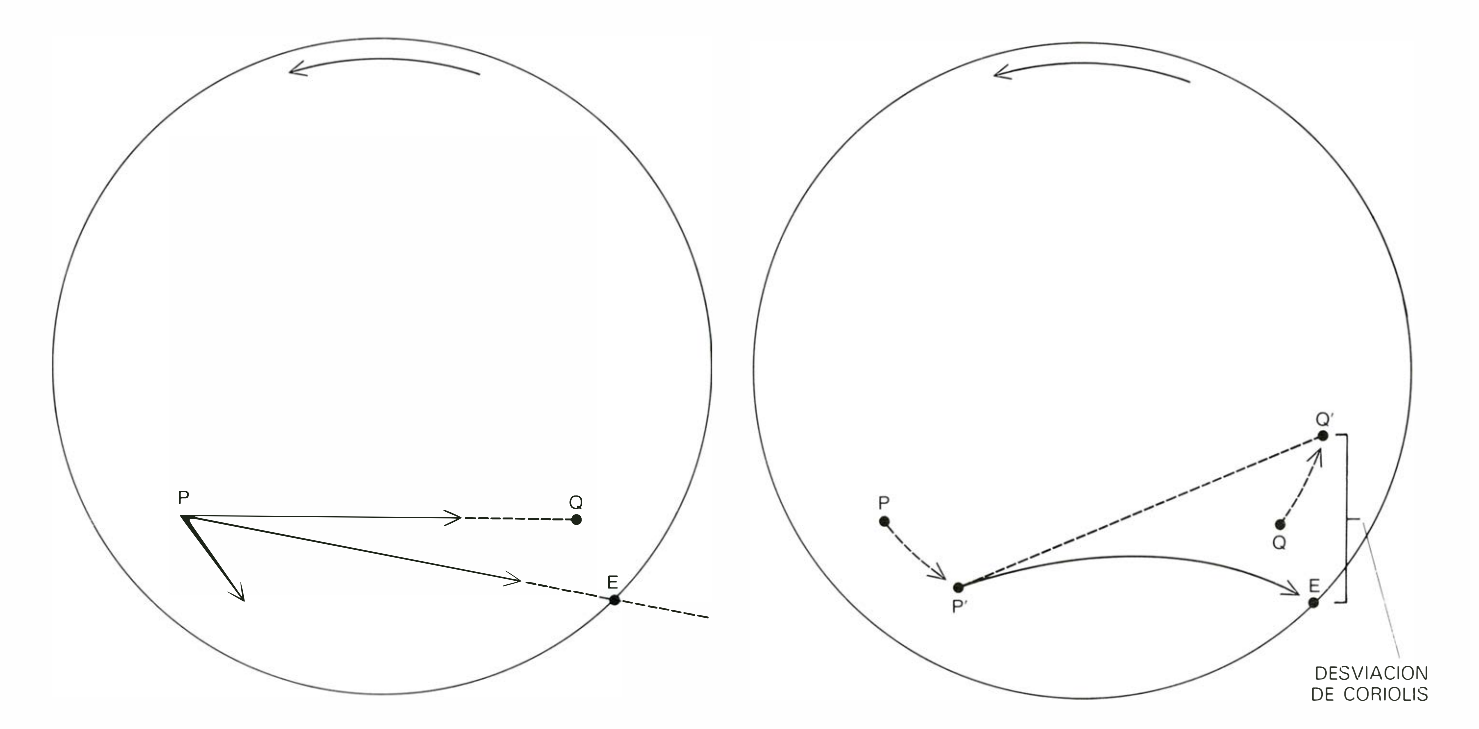
DINAMO DE DISCO DE FARADAY. Produce corrientes eléctricas (*flechas de color*) cuando un disco de cobre gira a través de las líneas magnéticas de fuerza procedentes de una varilla imanada (*arriba*) o de una bobina (*abajo*). En una dinamo automantenida (*abajo*), las corrientes eléctricas producidas sirven para reforzar el campo magnético de la bobina, de suerte que no se requiere suministro externo de magnetismo si se prescinde del inicial necesario para cebar la dinamo. El líquido metálico del núcleo fluye de tal modo que actúa como una dinamo mecánica al originar el campo magnético terrestre.

otras palabras, ya que las fuerzas de empuje realizan trabajo mecánico, se requiere un incesante suministro de energía para mantenerlas.

En la actualidad los geofísicos intentan construir modelos del núcleo terrestre idealizados que den cuenta de sus rasgos más importantes. Se estudia la naturaleza de la convección en fluidos que giran atravesados por campos magnéticos. Friedrich H. Busse, de la Universidad de California en Los Angeles, ha desarrollado un modelo dinámico ideal de fluido para analizar el efecto de la variación radial de la temperatura en una esfera fluida que gira rápidamente. Al igual que el campo gravitatorio en el núcleo terrestre, el campo gravitatorio en la esfera indicada está dirigido hacia su centro. Este estudio preliminar ignora los efectos de los campos magnéticos y trata solamente de los efectos de la rotación sobre el movimiento del flujo fluido motivados por las fuerzas gravitatorias que resultan de las diferencias de temperatura. Tales resultados, sin embargo, deberían ser también aplicables para otras causas de empuje. Los cálculos teóricos de Busse indican que, para variaciones de temperatura suficientemente grandes, los flujos impulsados por el empuje están altamente ordenados por la rotación y podrían originar los movimientos necesarios para una dinamo.

Basándose en este análisis Busse y uno de nosotros (Carrigan), que en 1973 era estudiante, pusieron en marcha en el laboratorio un modelo de flujo impulsado por el empuje. Consistía en una esfera de plástico que giraba rápidamente llena de agua, cuyas propiedades más importantes se suponía que eran análogas a las del núcleo fluido. La pequeña masa de la esfera significaba que su propia fuerza gravitatoria era despreciable en comparación con la fuerza centrífuga ejercida sobre el fluido como resultado de la rápida rotación. Por otra parte, en el núcleo terrestre la fuerza gravitatoria es mucho mayor que la fuerza centrífuga debida a la rotación diaria. Resulta que, cuando la fuerza de Coriolis es tan grande como lo es en el modelo, las intensas fuerzas centrífugas sirven adecuadamente para simular los efectos de la intensa fuerza gravitatoria del núcleo. Podemos introducir el empuje en el modelo mediante la imposición de una diferencia radial de temperatura en la esfera.

Hasta qué punto el modelo representa con fidelidad lo que sucede en el núcleo depende de que sean bien reproducidas a escala las fuerzas importantes, guar-



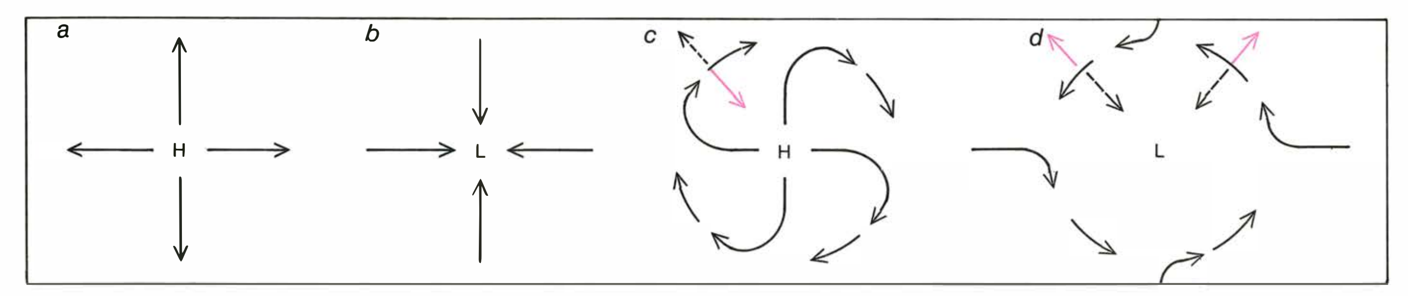
FUERZA DE CORIOLIS, que actúa sobre cualquier masa que se mueve respecto a unos ejes de referencia que giran. Puede ocasionar movimientos ciclónicos en gran escala en el fluido del núcleo terrestre. Un tiovivo que visto desde arriba gira en sentido opuesto al de las agujas de un reloj ilustra el efecto de la fuerza de Coriolis. A la izquierda, una persona en *P* arroja una pelota a otra en *Q*. El movimiento de rotación del hombre en *P* (*flecha corta*) motiva que la pelota vaya en la dirección *PE*. En el dibujo de la derecha el hombre en *P* ha pasado a *P'*, el hombre en *Q* a *Q'* y la pelota se ha trasladado a *E*. Los observadores en el tiovivo creen que la pelota se ha movido según una curva en virtud de una fuerza que actúa sobre ella.

dando las debidas proporciones entre ellas. Si el modelo se hace girar suficientemente deprisa en el laboratorio, el movimiento del agua en la esfera puede parecerse al movimiento del hierro en el núcleo. Como en cualquier modelo, los parámetros importantes son las razones entre las varias fuerzas presentes. En la dinámica de fluidos se denomina número de Ekman a la razón entre las fuerzas viscosas y las de Coriolis. En el núcleo terrestre, dicho número debe ser muy pequeño, del orden de 10^{-15}, pues la viscosidad es baja y los movimientos de gran alcance.

Mientras que la viscosidad del agua en el modelo puede ser comparable a la viscosidad del núcleo, las dimensiones de las esferas en el modelo son evidentemente millones de veces inferiores. A causa del pequeño tamaño del modelo las fuerzas viscosas serían dominantes al lado de las fuerzas de Coriolis si el modelo girara solamente a razón de una vuelta por día, tal como lo hace la Tierra. Para que la fuerza de Coriolis sea suficientemente intensa en comparación con las fuerzas de viscosidad, o en otras palabras, para que el número de Ekman del modelo sea comparable con el número de Ekman del núcleo terrestre, el modelo debe girar a razón de 500 vueltas por minuto, o sea, un millón de veces más deprisa de lo que lo hace la Tierra.

Para mantener la razón correcta entre las fuerzas de empuje y las fuerzas debidas a la viscosidad se introdujo una diferencia de temperatura de un grado Kelvin entre el centro de la esfera y su exterior. Si el empuje en el modelo fuese demasiado pequeño, el agua no circularía; y ello porque las fuerzas impulsoras no serían suficientes para neutralizar las fuerzas retardadoras. Si el empuje es justamente el necesario para iniciar el movimiento del agua, el flujo queda confinado a una estrecha región cilíndrica cuyo eje coincide con el de rotación de la esfera. Dentro de la región cilíndrica, el flujo consiste en pequeñas circulaciones altamente ordenadas, formadas por largos rodillos, que giran lentamente, alineados paralelamente al eje de rotación. El dispositivo recuerda el de los rodillos en un cojinete.

La aparición de los rodillos en el movimiento fluido se explica mediante un teorema de la dinámica de fluidos. Se aplica a los cuerpos fluidos en rotación



UN SISTEMA QUE NO GIRE no es afectado por la fuerza de Coriolis. El fluido se dirige simplemente hacia fuera de las altas presiones (*a*) y hacia dentro de las bajas presiones (*b*). En un sistema en rotación, piénsese en el núcleo terrestre, la fuerza de Coriolis desvía el flujo hacia la derecha en el hemisferio norte. Cuando la fuerza de Coriolis (*flechas de color*) neutraliza las fuerzas de presión (*flechas negras a trazos*), el fluido circula alrededor de las regiones de alta presión (*c*) y de las de baja presión (*d*). Este fenómeno explica el origen de la circulación en rodillos en el modelo del núcleo.

cuando la fuerza de Coriolis es mucho mayor que las demás fuerzas, tales como las de viscosidad, empuje e inercia. En este caso, únicamente las fuerzas debidas a las diferencias de presión son suficientemente grandes para contrarrestar la fuerza de Coriolis. Las fuerzas de presión son "conservadoras", es decir, no pueden cambiar los movimientos del fluido a lo largo de una dirección paralela al eje de rotación. En otras palabras, si el cuerpo que gira se corta a rebanadas perpendicularmente al eje, el teorema requiere que las líneas de flujo en una rebanada sean idénticas a las que se producen en cualquier otra. En particular, en una sección transversal las características de la circulación a rodillos son las mismas que en las secciones inmediatas.

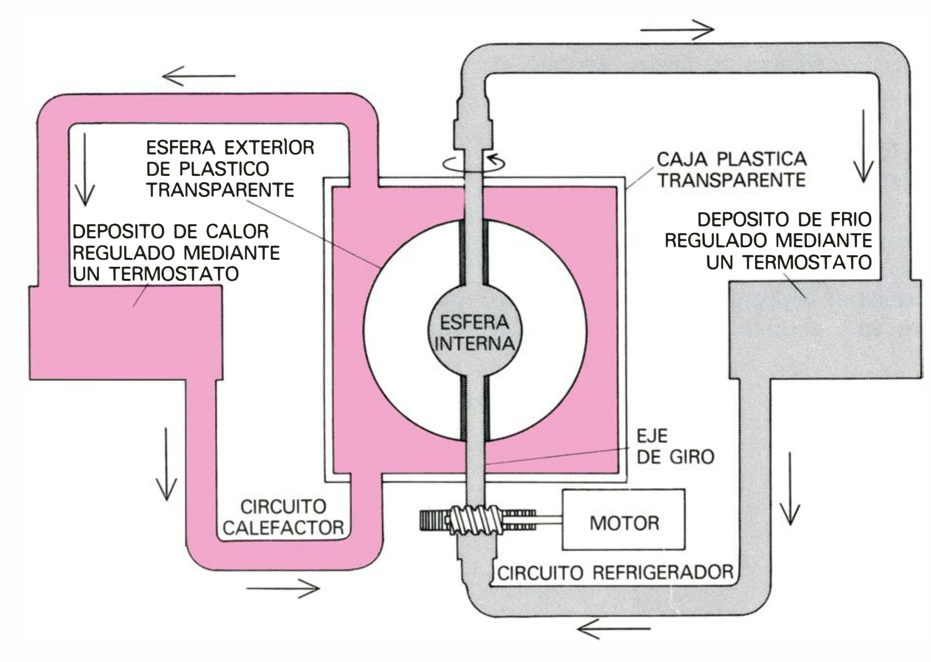
En un cuerpo esférico tal como el núcleo terrestre, o el modelo, el límite esférico impide que el flujo sea idéntico en cada sección normal al eje de rotación. Los límites en cada extremo del rodillo muestran inclinaciones opuestas; así, para un observador del modelo, la circulación hacia fuera del rodillo ocasiona que el fluido cerca del límite sea impulsado hacia arriba en el hemisferio inferior y hacia abajo en el superior. En la sección ecuatorial, el movimiento fluido es perfectamente horizontal.

En el modelo, aunque la viscosidad es pequeña, su efecto sobre el equilibrio entre las diferencias de presión y la fuerza de Coriolis es suficiente para establecer la existencia de circulaciones en rodillo. Sin embargo, en el núcleo la viscosidad es demasiado pequeña para ocasionar tal efecto, aunque los campos magnéticos pueden alterar el balance de fuerzas de un modo análogo. Las fuerzas debidas a la viscosidad y los campos magnéticos influyen también en los diámetros de las circulaciones en rodillo. En el modelo, los rodillos tienen un diámetro del orden del 10 por ciento del radio de la esfera para un fluido que muestre una viscosidad análoga a la del agua. Si la viscosidad aumenta, los rodillos se hacen más gruesos. En el núcleo, en donde el efecto de la viscosidad es despreciable, el diámetro de los rodillos importará una fracción más pequeña del radio del núcleo. Sin embargo, el experimento no indica si el campo magnético actuará o no como la viscosidad al hacer más gruesos los rodillos. La ausencia de campos magnéticos constituye, pues, una seria limitación de este modelo.

Supongamos que la esfera giratoria se hubiese llenado con un metal líquido, mercurio o sodio en vez de agua, por ejemplo. ¿Hubiera generado entonces la esfera su propio campo magnético? La respuesta es negativa. Cualquier corriente introducida en el fluido se habría extinguido en una fracción de segundo, tiempo que es demasiado corto para que se realice una acción de dinamo. Por otra parte, las corrientes eléctricas en el núcleo terrestre pueden subsistir unos 10.000 años sin necesidad de ser regeneradas, tiempo suficiente para que los lentos movimientos del núcleo fluido actúen como una dinamo. La duración de las corrientes eléctricas en un cuerpo es proporcional al cuadrado del radio del cuerpo multiplicado por su conductividad eléctrica. Debido a que las conductividades del modelo y del núcleo terrestre son análogas, es la gran diferencia entre los radios de uno y otro lo que explica el que las corrientes en el núcleo puedan durar 10^{17} veces más que las corrientes en el modelo. Para que éste tuviera alguna posibilidad de actuación, debería poseer un tamaño análogo al del núcleo. O bien, el modelo funcionaría si consistiera en un fluido cuya conductividad fuera casi infinita. En este caso, el modelo podría operar con su tamaño actual.

Al fallar la posibilidad de experimentos de laboratorio que reproduzcan los efectos de los campos magnéticos, los geofísicos han vuelto su atención hacia las consideraciones teóricas. Los recientes trabajos teóricos de G.O. Roberts, de la Universidad de Cambridge, y de otros investigadores, muestran que los movimientos fluidos pueden producir un campo magnético si poseen una "helicidad": el grado según el cual son torsionadas las líneas de corriente mediante bobinas dextrógiras o bien levógiras. Se tiene helicidad neta si hay más bobinas que motiven un giro en una dirección que en la opuesta. En el modelo del laboratorio, la helicidad se origina en los rodillos a causa del flujo inducido por los límites de la esfera. A base de la semejanza entre los movimientos fluidos en el trabajo teórico de Roberts y los del modelo del laboratorio, Busse demostró que las corrientes de convección generan un campo fundamentalmente dipolar. Además, probó que, en virtud de la acción de dinamo de los movimientos fluidos, el campo magnético puede aumentar sustancialmente partiendo de un pequeño valor inicial.

Imaginemos ahora que se pone en marcha un experimento de laboratorio en el cual un campo magnético crece en intensidad a partir de un tamaño microscópico. Inicialmente, el fluido conductor en el experimento no resultaría afectado por el campo magnético debido a que, al principio, el campo sería demasiado pequeño. Sin embargo, a medida que el campo magnético fuera creciendo, iría condicionando los movimientos fluidos. Existe un principio fundamental de la electricidad y el magnetismo con arreglo al cual un campo magnético ejerce una fuerza sobre un conductor que se opone al movimiento de éste. Si la dinamo terrestre fuese aná-



GRADIENTE DE TEMPERATURA en el modelo de núcleo terrestre mostrado en las fotografías de la página 83; se mantiene mediante el sistema de calefacción que muestra el diagrama de forma muy esquemática. En el modelo, la temperatura aumenta a medida que la distancia al centro crece. Tal gradiente de temperatura es opuesto al existente en el núcleo. Se ha diseñado así para compensar las diferencias entre gravedad en el núcleo y la fuerza centrífuga, que sustituye a la gravedad en el modelo.

loga a una dinamo de disco, accionada mediante una manivela que hiciera girar el disco, el esfuerzo necesario iría aumentando a medida que el campo magnético ofreciera mayor resistencia. El campo magnético suprimiría el movimiento del conductor en cuanto se alcanzara un equilibrio para el cual el campo presentaría un valor estacionario. En un conductor fluido, tal como el del núcleo terrestre, interviene además otro grado de libertad: la dirección del flujo. De este modo, el campo magnético podría alterar la dirección del movimiento fluido y cambiar las trayectorias. Esto puede reducir el efecto de dinamo, incluso si no disminuye la velocidad del fluido.

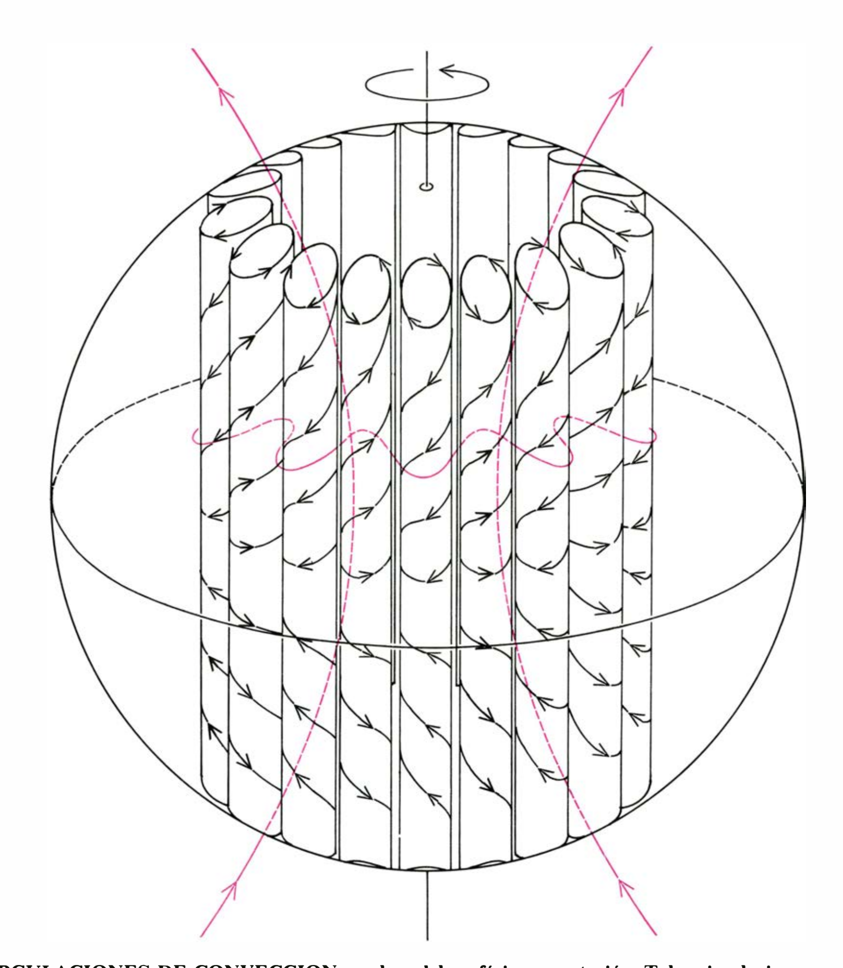
Debido a que no se ha podido construir todavía en el laboratorio un modelo en el cual el campo crezca a partir de un tamaño microscópico, no se conoce cómo una fuerza magnética incesantemente creciente cambiaría las trayectorias del flujo. Este es el objetivo del trabajo continuado de Busse y de P.H. Roberts y sus colaboradores en la Universidad de Newcastle upon Tyne. Busse ha calculado los cambios en la velocidad y dirección del fluido suponiendo que las fuerzas magnéticas son débiles. En cambio, el grupo de P.H. Roberts ha concentrado su atención en lo que sucede cuando dichas fuerzas son grandes.

Cuando las fuerzas magnéticas pasan a ser grandes, las trayectorias del flujo pueden alterarse drásticamente. En el modelo hipotético, es probable que las trayectorias en los rodillos verticales se hicieran menos definidas. Debería haber menos rodillos y más grandes; de repente, al alcanzarse un valor crítico del campo, las trayectorias pasarían a formar parte de un movimiento en gran escala, predominantemente horizontal. Esta posibilidad está mal conocida, pero se cree que en el campo magnético debe ser grande y toroidal. El campo consistiría en un anillo dentro del modelo esférico. Lo que realmente suceda en el núcleo terrestre depende de la intensidad del campo magnético correspondiente al equilibrio y de muchos otros factores que todavía no han sido estudiados.

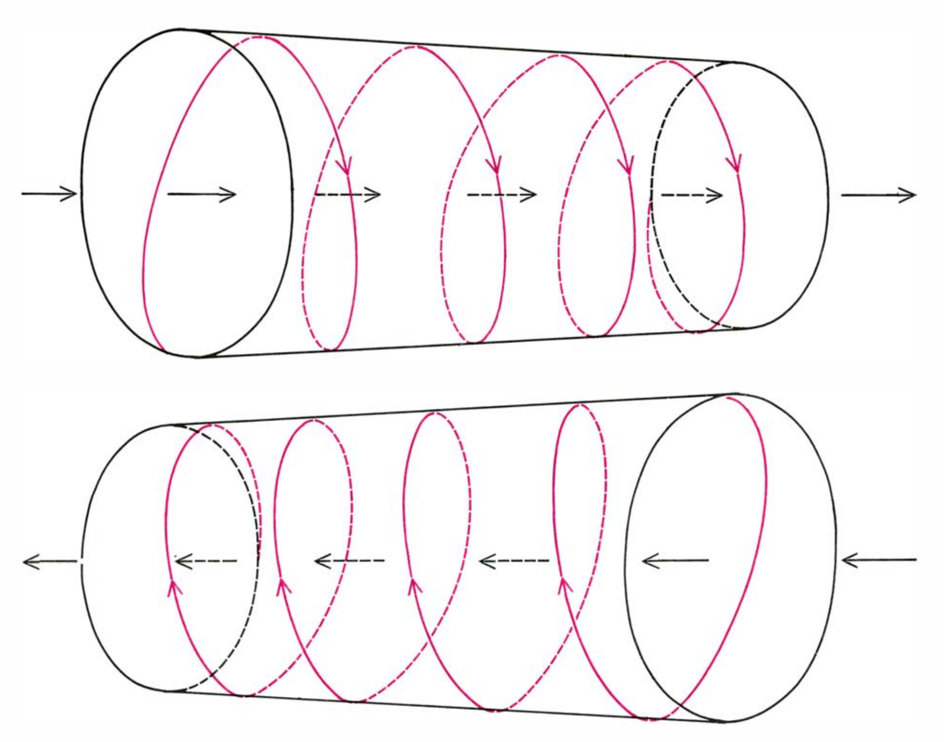
Se basa en la existencia de un gran campo magnético toroidal, una interpretación de la variación secular realizada por Raymond Hide, del servicio meteorológico inglés, y S.I. Braginsky, de la Universidad estatal M. V. Lomonosov de Moscú. Dichos autores sostienen que, bajo la influencia tanto de la rotación como del campo magnético, en el núcleo fluido hay ondas con períodos del orden de millares de años. Esta interpretación sugiere que la deriva hacia el oeste del campo magnético puede ser un fenómeno ondulatorio. Del mismo modo que el avance de las olas en un océano no implica un movimiento de avance del agua, así la deriva hacia el oeste del campo magnético no implica necesariamente que todo el núcleo gire con relación al manto, si es que se trata de un movimiento ondulatorio. La interpretación de Hide y Braginsky es solamente aplicable si el campo magnético toroidal es intenso. Esta es una de las razones más importantes que inducen a creer que lo sea.

Toda explicación aceptable del geomagnetismo debe dar la causa de las inversiones de los polos acaecidas varias veces en el transcurso de la historia. Los estudios paleomagnéticos indican que, antes de una inversión, el campo dipolar decae primero en intensidad durante unos 10.000 años; cambia luego bruscamente su polaridad y por fin su intensidad va creciendo. La otra posibilidad, la de que el dipolo se invierta conservando la intensidad, no resulta confirmada por los datos paleomagnéticos. Las ecuaciones matemáticas que describen la dinámica del núcleo no se alteran al cambiar el signo del campo magnético, de modo que el estado dinámico del núcleo es idéntico en el estado normal que en el estado invertido. Nadie ha dado una explicación de por qué se produce el cambio de signo. Las inversiones aparentemente al azar del campo dipolar terrestre permanecen inescrutables.

Las dinamos de disco pueden arrojar alguna luz sobre el fenómeno de la inversión; en determinadas circunstancias, muestran aparentemente una inversión al azar. La inversión se produce por acoplamiento entre varias partes del circuito eléctrico de la dinamo de disco. Es semejante al acoplamiento entre péndulos sostenidos por un mismo soporte. Por ejemplo, se tienen tres péndulos que, con pequeños espaciados, cuelgan de una cuerda horizontal. Si se hace oscilar uno de ellos, los demás empezarán también a oscilar. En ciertos instantes cada



CIRCULACIONES DE CONVECCION en el modelo esférico en rotación. Tales circulaciones muestran la apariencia de rodillos que giran lentamente. Debido a que los rodillos terminan en la superficie de una esfera, los movimientos fluidos no son paralelos al plano ecuatorial del modelo. En los límites de cada extremo de un rodillo son de inclinación opuesta; así, para un observador, la circulación en un rodillo motiva que cerca de los límites el fluido sea impulsado hacia arriba en el hemisferio inferior y hacia abajo en el superior. Estos movimientos pueden originar el campo magnético dipolar terrestre.



HELICIDAD es el grado según el cual las líneas de corriente del fluido son torsionadas para formar curvas helicoidales. En el modelo del núcleo terrestre, la helicidad se produce en los rodillos. El fluido en el rodillo superior traza una trayectoria helicoidal dextrógira (*color*), lo cual significa que el fluido circula en el mismo sentido que un sacacorchos dextrógiro. La helicidad en el rodillo inferior es también dextrógira, a pesar de que el flujo (*en negro*) tenga dirección opuesta. La importancia de la helicidad se descubrió hacia finales de los años 1960. (Ilustraciones dibujadas por Allen Beechel.)

uno de los péndulos se para por un corto intervalo de tiempo, y la energía va pasando incesantemente de uno a otro de los tres péndulos. Aunque el comportamiento de éstos es determinístico (es decir, los movimientos futuros pueden ser calculados a partir de las condiciones iniciales mediante las leyes de la dinámica), a un observador le podrá parecer que el intercambio de energía entre los péndulos se realiza al azar. Por las mismas razones, en las dinamos pueden presentarse inversiones que se dirían aleatorias, pero que en realidad son determinísticas. Existen semejanzas matemáticas entre las dinamos de fluidos y las de disco, de modo que las inversiones aparentemente al azar del campo magnético terrestre podrían también ser determinísticas. La formidable complejidad de las ecuaciones matemáticas que gobiernan las dinamos de fluidos han impedido hasta ahora a los físicos el investigar de una manera seria los modelos de inversión.

Una interpretación distinta, usualmente considerada, supone que la dinamo fluida "se desconecta" durante un cierto tiempo, con lo cual decae el campo dipolar y entonces vuelve a "conectarse", produciéndose un campo creciente en dirección opuesta. Aunque esta interpretación no contradice los datos disponibles, parece poco fundada. No hay razón alguna para creer que el núcleo permanece conectado durante millones de años entre las inversiones y se desconecte durante los pocos miles de años en los que se realiza la inversión polar. Parece más plausible suponer que las inversiones constituyen una característica natural de la dinamo que está actuando incesantemente para producir campos magnéticos del mismo modo que las dinamos de disco.

Considerando períodos de tiempo extraordinariamente largos, el carácter de la inversión polar ha cambiado. Por ejemplo, durante el Cretácico, que se extendió desde hace 135 a 65 millones de años, no hubo inversiones durante más de 20 millones de años. Un comportamiento tan a largo plazo está relacionado probablemente con cambios fundamentales en el mecanismo impulsor de la dinamo o en la forma del límite existente entre el núcleo y el manto. Una vez más, estas posibilidades han sido poco investigadas.

Es ya hora de que hablemos acerca de los posibles aportes de energía capaces de mantener los movimientos del núcleo fluido. Un suministro de energía es esencial para establecer fuerzas de empuje, pues éstas trabajan oponiéndose a las fuerzas debidas a la viscosidad y magnéticas. En el experimento realizado en el laboratorio con la esfera giratoria, la energía procede del calor suministrado para mantener los gradientes de temperatura. En el núcleo terrestre las cosas no pueden ser tan simples, pues la energía debe haber sido suministrada a ritmo constante durante varios miles de millones de años. La energía puede originarse de varias formas (gravitatoria, química y térmica), aunque en último extremo siempre pasa a la forma de calor que fluye hacia el manto. El suministro de energía no puede ser excesivo, ya que fundiría el manto o bien saldría de la Tierra a través de su superficie en mayor cantidad que la observada. Tales ligaduras hacen que la cuestión no sea tan trivial como parece

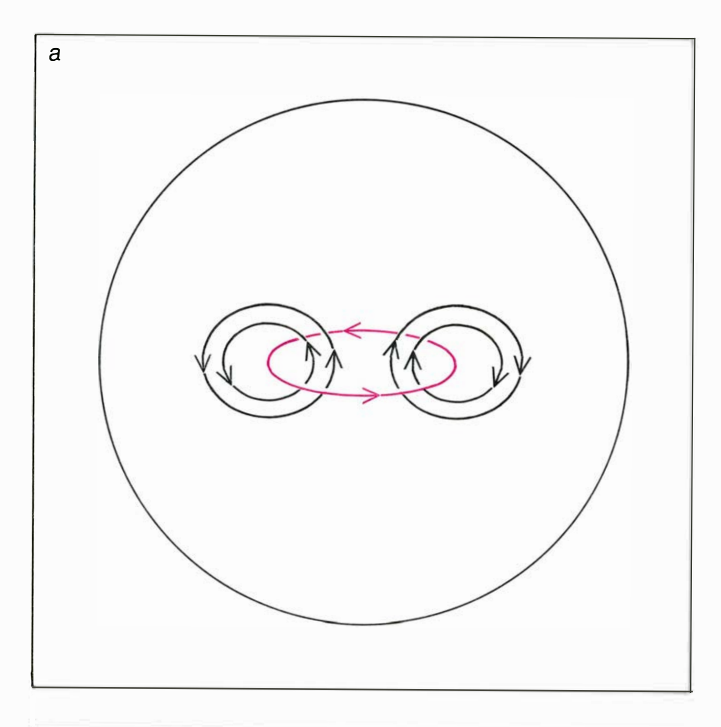
La energía calorífica necesaria para originar el empuje térmico podría proceder de la radiactividad del núcleo fluido si éste contuviera en número suficiente elementos radiactivos. Los principales elementos productores de calor son el uranio, el torio y el potasio. Los estudios teóricos acerca de la formación del núcleo sugieren que el uranio y el torio tienden a emigrar hacia el manto y la corteza, debiendo quedar únicamente trazas de ellos en el núcleo. Sin embargo, algunos investigadores han sugerido que el núcleo ha de contener potasio en abundancia; en cuyo caso, poseería una cantidad sustancial del isótopo radiactivo potasio 40. La hipótesis de que el potasio abunda en el núcleo no tiene gran aceptación, pues descansa en inciertas suposiciones acerca de la química y de la composición del núcleo.

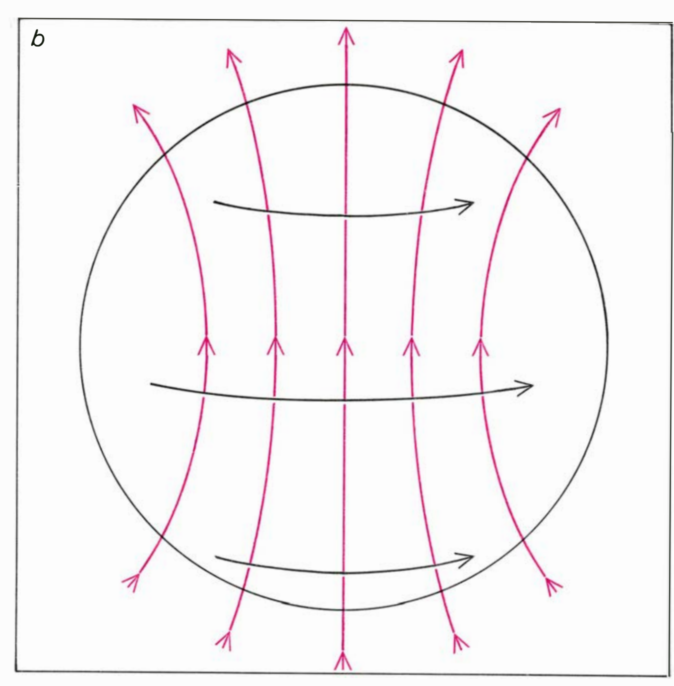
Una idea más prometedora estriba en suponer que la Tierra se está enfriando y con ello debe liberarse calor, que se suma al calor latente del núcleo líquido desprendido al irse solidificando paulatinamente en su parte más interna. La capacidad térmica del núcleo es tan grande que un descenso uniforme de temperatura de 100 grados Kelvin extendido a un período de tres mil millones de años daría la cantidad de calor suficiente. Para que el calor impulse la dinamo debe haber corrientes de convección a través del manto que lleven el calor hacia fuera. El enfriamiento motiva asimismo una contracción en la Tierra, y con ello una pérdida de energía gravitatoria.

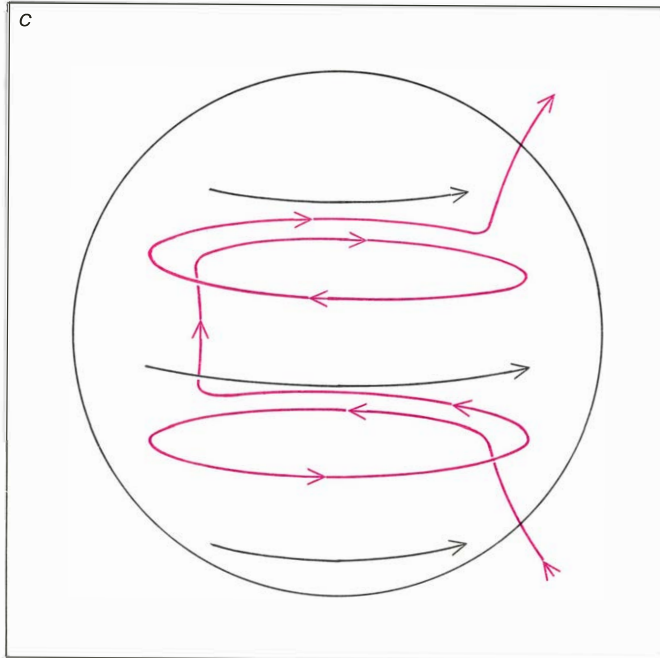
Si el contraste de densidad entre el material del núcleo interno y el núcleo externo es tan grande como piensan los sismólogos, la energía gravitatoria liberada es considerable. Tal energía pasaría en último extremo al núcleo como calor y, finalmente, sería trasladada a la su-

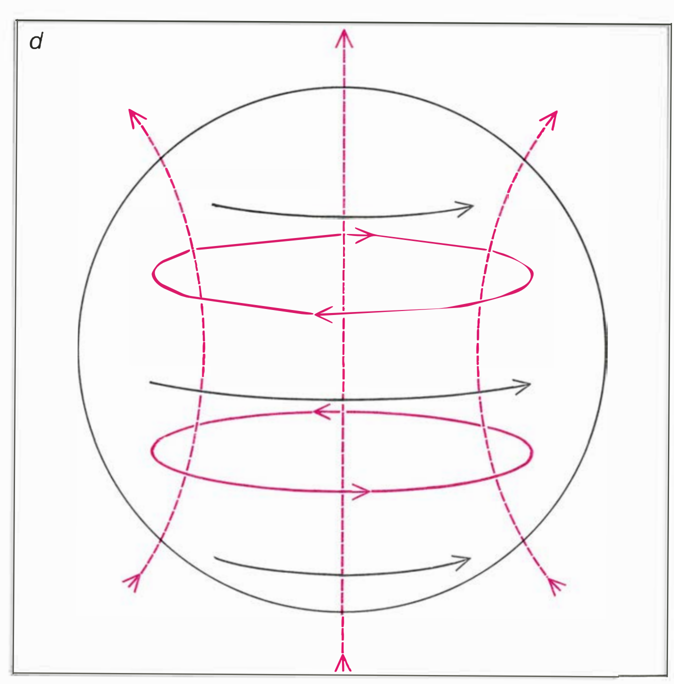
perficie mediante la convección en el manto.

Las medidas experimentales dan como límite superior del calor que fluye a través de la superficie terrestre el de unos 4×10^{13} watt. Se sabe que la mayor parte de este calor procede de la radiactividad de la corteza, y queda una parte del orden de 10^{13} watt para el que viene del núcleo. Si el calor del núcleo proviene del núclido radiactivo potasio 40, la concentración de potasio en el núcleo debería ser de 800 partes por millón. Es más plausible suponer que el calor ha sido suministrado gracias a un descenso de la temperatura de 100 grados Kelvin durante tres mil millones de años. En este caso, el calor procedería de tres orígenes comparables ya mencionados: el descenso de temperatura, la liberación del calor latente al solidificarse el núcleo y el descenso de energía gravitatoria al contraerse el núcleo que se enfría. La cuestión crucial reside en saber si 10^{13} watt constituyen una potencia suficiente para mantener el campo magnético terrestre. No es mucho para un









LINEAS TOROIDALES de campo magnético. Se presentan probablemente en el núcleo terrestre. Un anillo (*línea de color*), que es el tipo más simple de campo toroidal, aparece en el dibujo superior izquierdo. Las corrientes eléctricas (*líneas negras*) originadas por este campo corren radialmente, pero no pueden penetrar en el manto terrestre porque éste es aislante. Las corrientes no pueden atravesar el manto; y, por tanto, no puede detectarse un campo magnético toroidal desde la superficie terrestre. Los tres dibujos restantes ilustran cómo los movimientos fluidos al actuar sobre un campo, inicialmente dipolar, pueden dar origen a grandes campos toroidales. En la parte superior derecha, un campo dipolar (*líneas de color*) se superpone a un fluido en rotación (*líneas negras*), cuya velocidad de giro varía en el núcleo de unos puntos a otros. En la parte inferior izquierda, las líneas del campo se deforman en virtud de la rotación no uniforme del fluido. El fluido empuja cada línea de campo dipolar de modo que tienda a una forma toroidal. En la parte inferior derecha, otros efectos de los movimientos del fluido motivan que las líneas de campo formen anillos. Estos campos, predominantemente toroidales, van en direcciones opuestas en el hemisferio norte que en el hemisferio sur. (Dibujos de Allen Beechel.)

cuerpo tan grande como el núcleo terrestre. Es sólo el doble de la energía que por segundo consumen las actividades humanas en Norteamérica.

Los ingenieros se apoyan en consideraciones termodinámicas para valorar la conversión ideal de energía en las centrales eléctricas sin necesidad de conocer la potencia de las turbinas o generadores. De modo análogo, tal valoración puede realizarse en el núcleo sin conocer ciertos aspectos de su interior. En el núcleo se estima que una potencia entre 10^9 y 10^{12} watt se pierde en las corrientes que generan el campo magnético. Se necesitará una cantidad de calor mayor para impulsarlas, que dependerá de cómo funcione la dinamo del núcleo. Al igual que en una central eléctrica que convierte calor en electricidad, el rendimiento de la dinamo del núcleo es el cociente entre la energía producida y el calor suministrado. Hay, sin embargo, una diferencia esencial entre los dos sistemas: las corrientes eléctricas en el núcleo disipan el calor producido en el mismo núcleo y parte de este calor se utilizará para impulsar las corrientes de convección, del mismo modo que en una central eléctrica térmica puede emplearse algo del calor desprendido para calentar sus hervidores. Por otra parte, algo del calor puede dificultar la convección, del mismo modo que resultaría perjudicado el rendimiento de un máquina térmica en la que se llevara calor a las torres de refrigeración.

El rendimiento termodinámico ideal para una dinamo impulsada térmicamente es del 20 por ciento según los cálculos de George E. Backus, de la Universidad de California en San Diego. Encontró que el rendimiento ideal se obtiene con una dinamo de disco impulsada por una máquina térmica ideal que operara entre dos temperaturas fijas con tal que el calor disipado en la bobina de la dinamo realimentara el depósito térmico de la máquina. Sin embargo, el núcleo terrestre se distingue de tal máquina en que su comportamiento dista de ser ideal y por ello su rendimiento es inferior al 20 por ciento. Su rendimiento real es probablemente del orden del 5 por ciento. La causa estriba en que el calor en el núcleo puede disiparse no sólo por convección sino también por conducción. Cuando ésta entra en juego, el calor de conducción no contribuye al movimiento de la dinamo. Un rendimiento del 5 por ciento significa que, por cada unidad de calor producida para mantener las corrientes eléctricas, pasa una cantidad veinte veces mayor desde el núcleo hacia el manto. Como consecuencia, las dinamos impulsadas térmicamente todo lo más pueden producir un débil campo magnético, pero de ningún modo un gran campo toroidal del tipo requerido por la interpretación de Hide y Braginsky para dar cuenta de la variación secular.

Las pobres posibilidades de una dinamo térmica han llevado a Braginsky y uno de nosotros (Gubbins) a estudiar la energía gravitatoria como una fuente alternativa de potencia. Parte de la energía gravitatoria desprendida en la concentración del núcleo aparece como calor de compresión, pero en cantidad muy pequeña. Se han realizado estimas de las diferencias de densidad entre el material sólido del interior del núcleo y del líquido de la parte exterior, a partir de mediciones sismológicas, por T.G. Masters, de la Universidad de Cambridge. Aunque estos cálculos son toscos, no permiten suponer diferencias de densidad inferiores al 20 por ciento. Esto significa que en el núcleo interno hay una proporción de hierro y niquel mayor que en el líquido de la parte exterior.

Cuando el líquido se solidifica el hierro emigra hacia el núcleo interno sólido mientras los materiales ligeros permanecen en la parte líquida exterior del núcleo y proporcionan el empuje. Las corrientes de convección agitarán el líquido y distribuirán uniformemente el material ligero. La energía gravitatoria que se pierde mediante esta redistribución puede transformarse en energía calorífica por calentamiento eléctrico, por flujo viscoso y por difusión molecular del material ligero a través de todo el líquido. Las propiedades del hierro líquido son de tal tipo que hacen que el calentamiento eléctrico sea el más importante de dichos efectos, pues tanto la viscosidad del hierro como las velocidades de difusión del material ligero son bajas. El campo magnético se considera como un medio que permite convertir la energía gravitatoria en calor.

Lo más notable de la dinamo impulsada gravitatoriamente reside en que, bajo ciertas condiciones, su rendimiento es casi del 100 por ciento. La mayor parte de la energía se emplea en producir el campo magnético. Un modelo de tal índole es mucho más satisfactorio que el de la dinamo impulsada térmicamente, en la cual se malgasta mucha energía. Una fuente de energía gravitatoria puede producir campos magnéticos de centenares de gauss sin expulsar demasiado calor hacia el manto. Además, parece que la dinamo impulsada gravitatoriamente deberá desempeñar un destacado papel en los futuros modelos del núcleo.

Influencia del estetoscopio en el desarrollo de la medicina

El estetoscopio, primer instrumento utilizado de modo general para el diagnóstico, transformó la práctica de la medicina en el siglo XIX, cambiando la imagen de la enfermedad que tenían los médicos

Stanley Joel Reiser

En 1816, el médico francés René Théophile Hyacinthe Laënnec fue llamado junto a la cabecera de una joven que presentaba los síntomas de una cardiopatía. En esta época, la mayor parte de los médicos llegaba a un diagnóstico observando la apariencia del enfermo e interrogándole acerca de sus síntomas. Enfrentado con un diagnóstico de dificultad poco habitual, Laënnec recurrió a dos métodos, muy raros entonces, que implicaban contacto físico con el enfermo: la palpación manual del cuerpo, para explorar las estructuras subyacentes, y la percusión del tórax con los dedos, con el fin de producir sonidos que indicaran el estado de los órganos internos. Ambos procedimientos fracasaron debido a la obesidad de la paciente. Por otra parte, las costumbres de la época impidieron a Laënnec intentar la auscultación inmediata, aplicando el oído al tórax para escuchar los sonidos cardíacos. Desanimado, recordó que el sonido se amplifica cuando se transmite a través de ciertos cuerpos sólidos. Enrolló un cuaderno hasta formar un cilindro y, aplicando un extremo en el tórax de la enferma, puso el oído en el otro. A través de este instrumento improvisado, escuchó los sonidos de la función cardíaca con mayor claridad que lo habían sido hasta entonces.

Laënnec llamó estetoscopio a su invento, del griego *stēthos,* "pecho", y *skopein,* "ver". Pronto sustituyó el rollo de papel por el que sería llamado estetoscopio de Laënnec: un cilindro de madera de unos treinta centímetros de largo y cuatro de diámetro, que podía desmontarse en dos partes para transportarlo con mayor facilidad. A lo largo de su eje longitudinal, el cilindro tenía un estrecho conducto que Laënnec, experimentando con diversos modelos, había comprobado que favorecía la transmisión del sonido por parte del instrumento. La transmisión de algunos sonidos como los respiratorios fue posteriormente facilitada por una cavidad en forma de embudo situada en el extremo del cilindro, que se apoyaba en el pecho del enfermo. Si había que explorar otros sonidos, como los cardíacos, se colocaba en la cavidad un pequeño obturador de madera. Al comprobar que el estetoscopio le permitía oír los sonidos producidos por las funciones de todos los órganos torácicos, Laënnec se dedicó a desarrollar una técnica sistemática de diagnóstico basada en la exploración física con este instrumento. A consecuencia de su clara y vigorosa exposición de esta técnica, que llamó auscultación mediata, el estetoscopio se convirtió en el primer instrumento ampliamente utilizado por los médicos para diagnosticar enfermedades.

Es evidente que el diagnóstico –proceso de determinar, partiendo de los síntomas, la enfermedad que sufre un paciente– es una fase crucial de la asistencia médica. La aceptación del estetoscopio condujo a convertir la exploración física en fundamento del diagnóstico, lo que produjo una profunda transformación de la práctica médica, cambiando, tanto las ideas del médico acerca de la enfermedad, como su relación con el paciente. El estetoscopio proporcionó por vez primera al médico un mundo privado en el que disponía de signos procedentes directamente del cuerpo del enfermo. Ello le permitió formular diagnósticos objetivos pero, al mismo tiempo, lo distanció de los aspectos personales de la enfermedad, abriéndose entonces una brecha que hoy continúa ensanchándose. En la actualidad, el estetoscopio, quizás el más conocido de todos los instrumentos médicos modernos, ha sido superado por la corriente que tiende a crear formas cada vez más precisas de tecnología diagnóstica. Para comprender cómo se ha desarrollado este proceso, conviene considerar primero el estado de la exploración médica antes de su invención.

A comienzos del siglo XIX, los diagnósticos se basaban principalmente en la exposición verbal del propio paciente acerca de su enfermedad y en las observaciones que el médico (sin otra ayuda que sus sentidos) hacía del color de la piel, el estado de la lengua, la respiración, etc., del enfermo. Durante el siglo XVIII, sin embargo, se había comenzado a prestar atención a unas pocas técnicas de exploración manual. Una de las más significativas, en lo que respecta al cambio de actitud ante el diagnóstico clínico, era la percusión, que Laënnec utilizó en su enferma cardíaca; consiste en percutir el cuerpo para producir sonidos que indiquen el estado de los órganos internos.

La percusión había sido ideada por el médico vienés Leopold Auenbrugger, que la describió por vez primera en su *Inventum novum*, pequeña monografía publicada en 1761. Auenbrugger señaló, como haría Laënnec 58 años después, que la observación por parte del médico de las manifestaciones externas de enfermedad apenas servía para el diagnóstico de las afecciones torácicas. Enfermos con el mismo trastorno presentaban a menudo síntomas diferentes y pacientes con enfermedades distintas tenían, con frecuencia, los mismos signos. Auenbrugger criticó también la exposición de los síntomas por el propio enfermo, estimándola variable e insegura. Para el médico vienés, el indicador más fiable

de la naturaleza y el curso de las enfermedades torácicas era el sonido morboso, que se ponía de manifiesto al percutir al paciente. En *Inventum novum*, proclamó que era capaz de diagnosticar (traducido del latín) "a base del testimonio de mis sentidos".

Auenbrugger intentaba encontrar señales objetivas de enfermedad y creía que la técnica de la percusión, que reducía al mínimo la importancia de la personalidad y del aspecto físico del paciente, iba a revolucionar el diagnóstico de las afecciones torácicas, proporcionando a los médicos un método superior a los inseguros que habitualmente utilizaban. Por desgracia, su método para deducir la naturaleza de una afección interna, basándose en el tipo de sonido que se producía al percutir el tórax, chocaba tanto con las doctrinas médicas do-



EL ESTETOSCOPIO comenzó siendo un instrumento monoaural, rígido y de madera y se ha convertido en binaural y flexible, generalmente construido de goma, plástico y metal. El instrumento de madera de la izquierda es un estetoscopio de Laënnec. Debe su nombre a su inventor, René Théophile Hyacinthe Laënnec, que en 1816 utilizó por vez primera un cuaderno enrollado para amplificar y transmitir hasta su oído los sonidos producidos por el movimiento de los órganos torácicos. Las propiedades acústicas de dicho estetoscopio se potenciaron con un estrecho conducto a lo largo de su eje longitudinal, que terminaba en una cavidad en forma de embudo situado en el extremo del cilindro que se apoyaba en el pecho del enfermo. La pequeña pieza de madera, primera por la izquierda, se colocaba en la cavidad para mejorar la transmisión de algunos sonidos, entre ellos los cardíacos. El empleo del estetoscopio binaural y flexible, de superiores condiciones acústicas, se generalizó a partir de 1890. El estetoscopio de Littmann, situado a la derecha, es una versión actual del mismo. En la parte que se aplica al tórax, tiene, por un lado, una campana metálica con un reborde de goma, para recoger sonidos de tono más bajo; por otro, una campana más plana cubierta con una membrana fina y tensa de plástico, para los de tono más elevado. El estetoscopio de madera se conserva en el Warren Anatomical Muscum, de Harvard Medical School; quizá perteneció a Laënnec.

minantes en su época, que la percusión no consiguió despertar la atención que merecía.

Para interesarse por la percusión, un médico tenía que concebir la enfermedad en términos anatómicos, explicando la génesis de los síntomas de un paciente concreto en relación con cambios estructurales en los tejidos somáticos. Esta concepción de la enfermedad era muy heterodoxa a mediados del siglo XVIII, ya que la mayoría de los médicos continuaba defendiendo la antigua teoría griega según la cual las enfermedades estaban producidas por desequilibrios en los fluidos orgánicos básicos llamados humores. El interés por la morfología normal y por las lesiones anatómicas producidas por las enfermedades se había desarrollado a partir del siglo XVI, durante el cual se publicaron tratados renovadores como *De humani corporis fabrica* de Vesalio. No obstante, los médicos de la centuria dieciochesca continuaban pensando que las lesiones anatómicas eran de importancia secundaria para entender la génesis de las enfermedades y la aparición de los síntomas. El libro del anatomista italiano Giovanni Battista Morgagni *De sedibus et causis morborum per anatomen indagatis (Las localizaciones y las causas de las enfermedades investigadas anatómicamente),* que influyó poderosamente en que los médicos pensaran en términos morfológicos, se publicó el mismo año que el *Inventum novum* de Auenbrugger y, por ello, pesó poco en las primeras reacciones ante la percusión. (Por el contrario, en la época en la que Laënnec comenzó sus estudios sobre la auscultación mediata, aportaciones como las de Auenbrugger y Morgagni habían conducido a una actitud más favorable a las explicaciones anatómicas de la enfermedad.)



LAËNNEC (grabado de la época) creó también una técnica innovadora y sistemática para aplicar el estetoscopio al diagnóstico de las enfermedades. Con anterioridad, los diagnósticos se basaban fundamentalmente en el relato que el propio enfermo hacía de sus síntomas y en la observación del paciente por parte del médico; la exploración física directa desempeñaba un papel insignificante o no se utilizaba. La técnica de Laënnec, que denominó auscultación mediata, permitió diagnósticos más seguros porque se basaba en el análisis de signos auditivos recogidos en la exploración con el estetoscopio.

En la falta de entusiasmo por la percusión, influyó también la forma en la que la expuso Auenbrugger. Las diferencias entre los sonidos percutorios que permitían diagnosticar las enfermedades eran muy pequeñas. Para aprender a aplicar el método, el médico necesitaba descripciones detalladas y muchos ejemplos de estos complejos fenómenos acústicos. En su breve tratado, Auenbrugger decidió ofrecer solamente explicaciones concisas y vagas, confiando en que su descubrimiento sería valorado "por los que de entrada pueden apreciar la ciencia médica". Por el contrario, renunció a formular su técnica para escépticos y críticos, que consideró "dominados por la envidia, la malicia, la difamación y la calumnia".

La técnica de la percusión de Auenbrugger tenía varios fallos. Por ejemplo, no era eficaz en pacientes cuyas alteraciones estuvieran situadas profundamente en la cavidad torácica. La comparación de los sonidos morbosos y normales en el mismo enfermo desempeñaba un importante papel en el diagnóstico por percusión, de forma que el método no resultaba rentable en enfermos con los dos pulmones afectados. Los médicos actuales que utilizan la percusión ponen los dedos de una mano sobre el cuerpo del paciente para amortiguar los golpes que dan con la otra, pero la forma de percutir que preconizaba Auenbrugger era más violenta, ya que consistía en golpear directamente el cuerpo del enfermo con las puntas de todos los dedos de una mano. Este procedimiento podía ser bastante molesto para el paciente, por lo que algunos médicos lo rechazaron. Además, en esta época, cualquier actividad manual era generalmente considerada impropia de la dignidad del médico. La proximidad física que exigía la percusión amenazaba el prestigio profesional del médico, situándolo en la misma posición que el cirujano, al que se creía superior desde el punto de vista profesional y social.

Laënnec se enfrentó en su época con unas resistencias médicas y sociales a la exploración física muy parecidas a las que Auenbrugger había encontrado a mediados del siglo XVIII. No obstante, durante el período que transcurrió entre la invención de la percusión y la de la auscultación mediata, se había producido un cambio significativo. Ya en 1816, los médicos se sentían, en general, inclinados a considerar que las lesiones anatómicas específicas eran señales seguras de determinadas afecciones, y que podían utilizarse para el diagnóstico clínico. Sobre todo, la correlación entre los

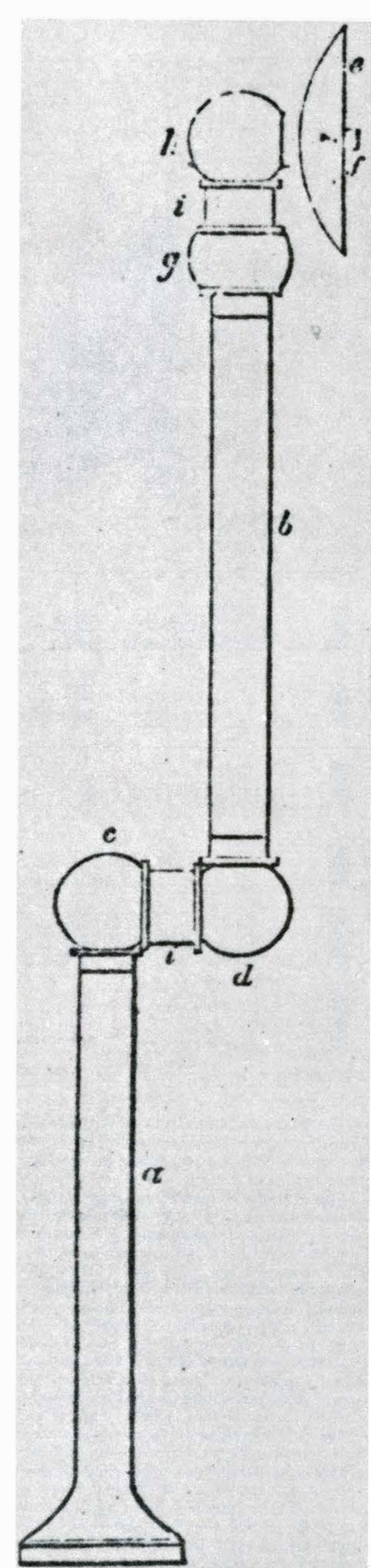
síntomas en el paciente vivo y los cambios estructurales comprobados en el cadáver mediante la autopsia comenzaba a desempeñar un importante lugar en la investigación y la enseñanza médicas. Así, Laënnec pudo demostrar mediante autopsias que, si se oían en el tórax sonidos de un tipo determinado, se encontrarían en el cadáver lesiones asimismo específicas.

Igual que Auenbrugger, Laënnec creía que un conjunto de signos sonoros podía ser el fundamento de una nueva y más segura técnica diagnóstica. Durante tres años se dedicó en el Hospital Necker de París a auscultar a sanos y enfermos, escuchando murmullos, estertores, jadeos y gorgoteos torácicos, y a realizar autopsias para identificar y clasificar los sonidos. En 1819, publicó el *Traité de l'auscultation médiate,* detallada crítica de los métodos diagnósticos de la época, que culminaba en una descripción exhaustiva de la técnica de la auscultación mediata. La obra es una exposición minuciosa de la correlación entre sonidos generados en el interior del organismo y lesiones anatómicas y enfermedades específicas. Diez veces más extensa que la monografía de Auenbrugger sobre la percusión, incluye descripciones de sonidos con una claridad que supera casi todo lo que se había publicado hasta entonces. "Cuando el paciente tosía o hablaba y aún más cuando respiraba", afirma Laënnec al exponer un caso, "se oía un tintineo como el de una campanilla que hubiese acabado de sonar en ese momento o el de un mosquito zumbando dentro de un jarrón de porcelana". Estas descripciones tan expresivas contribuyeron notablemente al éxito de la auscultación mediata, despertando el interés y el respeto de un amplio sector de médicos.

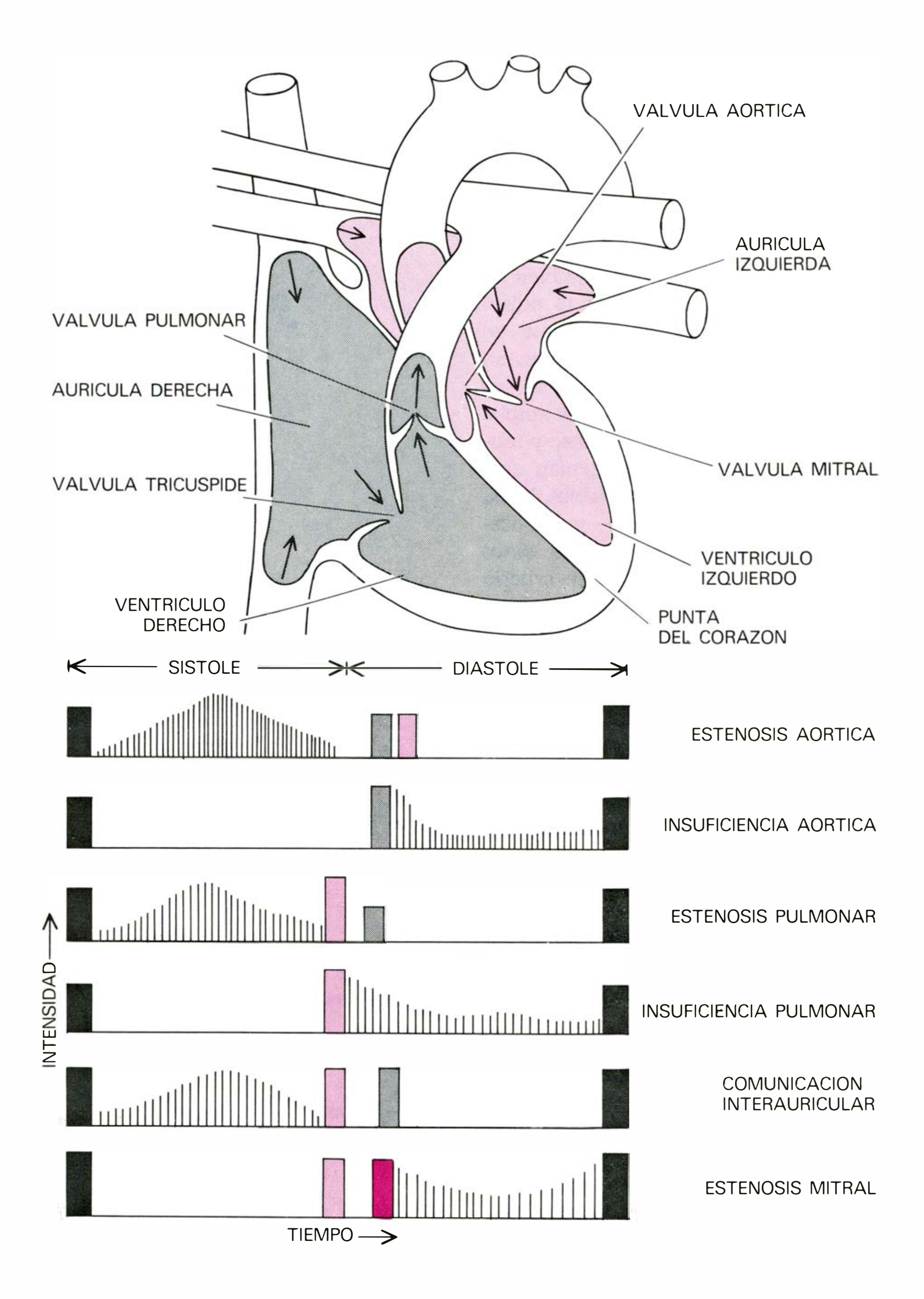
Al principio, los médicos encontraron diversas razones para criticar la técnica. Algunos pensaron que podían parecer ridículos inclinados sobre sus pacientes para escuchar sonidos con un instrumento semejante a una varita mágica. Por otra parte, se mantenía el prejuicio de que el uso de instrumentos y técnicas manuales era indigno de la posición del médico. El transporte del instrumento era especialmente molesto, por lo que algunos médicos utilizaron recursos como llevar las dos partes desmontadas del estetoscopio dentro del sombrero de copa. (Esta costumbre no estuvo desprovista de peligros. En una ocasión, una bola de nieve derribó el sombrero de copa donde llevaba su estetoscopio un estudiante de medicina, que fue acusado de transportar un arma oculta.)

Además, muchos médicos encontraron exageradas las opiniones de los primeros defensores del estetoscopio. En su *Auscultación mediata,* Laënnec calificó de toscos los métodos habituales de la época, incluidas las técnicas manuales, afirmando que la palpación era "demasiado vaga e insegura para ser de utilidad" y la percusión era solamente un poco más valiosa. Criticó también la práctica tradicional de tomar el pulso, explicando su popularidad porque no molestaba ni al médico ni al enfermo, pero subrayando que cualquiera de sus irregularidades se prestaba a una amplia serie de interpretaciones. Laënnec y muchos de sus seguidores mantenían que, para formular diagnósticos fiables, había que basarse principalmente –y, en ocasiones, exclusivamente– en los datos auscultatorios. Otros médicos de criterio más amplio pensaban que había que tener en cuenta por igual la auscultación y los métodos tradicionales, rechazando el punto de vista unilateral de Laënnec y sus partidarios. En realidad, la exageración de las posibilidades del estetoscopio se debía en parte a las extraordinarias facultades de Laënnec. Tenía un oído notablemente agudo y un conocimiento preciso de la significación patológica de las más pequeñas variaciones sonoras, lo que le permitía diagnosticar enfermedades con sorprendente exactitud, a base de datos auscultatorios. Pocos de sus seguidores tuvieron conciencia de su excepcional habilidad.

Las reacciones de los enfermos ante el estetoscopio fueron, en general, favorables, aunque algunos se asustaban (por asociar los instrumentos a los cirujanos) o se sentían violentos por la cercanía física del médico que exigía la auscultación. Otros pacientes se negaban a ser explorados con el estetoscopio, por la excesiva fuerza con que el médico lo aplicaba o debido a la molestia de tener que cambiar de posición con frecuencia durante la exploración. No obstante, lo que más temían los enfermos era la precisión del estetoscopio, ya que terminaba a menudo con la última esperanza



ESTETOSCOPIO parcialmente flexible, ideado en 1829 por el médico de Edimburgo, Nicholas Comins. Constaba de dos tubos rígidos *(a, b)* unidos por una articulación y con un auricular movible adosado *(e)*. El instrumento podía colocarse en cualquier ángulo, de forma que, durante la exploración, el enfermo no tenía que cambiar tan a menudo de postura, ni el médico que inclinarse tanto. Más tarde, se diseñaron estetoscopios plenamente flexibles construidos con tubos plegables; ahorraron a los enfermos la molestia de un instrumento rígido apretado contra el cuerpo e hicieron innecesario un estrecho contacto físico entre médico y paciente durante la auscultación.



LOS SOPLOS PATOLOGICOS CARDIACOS son alteraciones de los sonidos auscultatorios normales producidas por lesiones anatómicas del corazón. La intensidad y duración de varios sonidos de este tipo (tal como se oyen en localizaciones específicas del tórax) se esquematizan en la parte inferior de la figura; el flujo de la sangre a través del corazón se representa en la superior. Las contracciones de los ventrículos cardíacos empujan la sangre a través de los territorios orgánicos. El sístole es el período durante el cual se contraen los ventrículos derecho e izquierdo, que impelen la sangre hacia la arteria pulmonar y la aorta respectivamente; el diástole, el momento durante el que los ventrículos se relajan. En un ciclo cardíaco normal se oyen dos sonidos: en primer lugar, el cierre simultáneo de las válvulas mitral y tricúspide, que impide que la sangre refluya a las aurículas cuando los ventrículos se contraen; en segundo término, el cierre no enteramente simultáneo de las válvulas pulmonar y tricúspide, que evita que la sangre vuelva a los ventrículos cuando se relajan. En los esquemas, el primer sonido de cada ciclo está representado por un rectángulo negro y el segundo, por uno gris (componente pulmonar) y otro de color claro (componente aórtico). Los sonidos de tono más bajo se indican con líneas más espaciadas. Si la válvula aórtica se estrecha u obstruye (estenosis aórtica), durante el sístole, cuando la sangre es impelida a su través, se genera una turbulencia anormal que produce un sonido que se eleva anormalmente para después descender, llamado soplo sistólico. En la insuficiencia aórtica, no funciona la válvula aórtica, de forma que la sangre refluye a los ventrículos durante el diástole, produciendo un sonido suave y prolongado, llamado soplo diastólico. Si existe un orificio en el tabique que separa ambas aurículas, fluye a su través gran cantidad de sangre durante el diástole, lo que ocasiona que se separen completamente los componentes aórtico y pulmonar del segundo tono; durante el sístole, el ventrículo derecho empuja la sangre a la arteria pulmonar, causando un soplo sistólico. Cuando la válvula mitral se estrecha u obstruye (estenosis mitral), se oye un chasquido de apertura de la misma *(rectángulo de color obscuro)* al comienzo del diástole, seguido de un ruido sordo y grave cuando la sangre fluye al ventrículo izquierdo. Los esquemas de la figura se han adaptado del libro *Bedside Diagnostic Examination (Examen diagnóstico de cabecera)*, de Elmer DeGowin y Richard DeGowin.

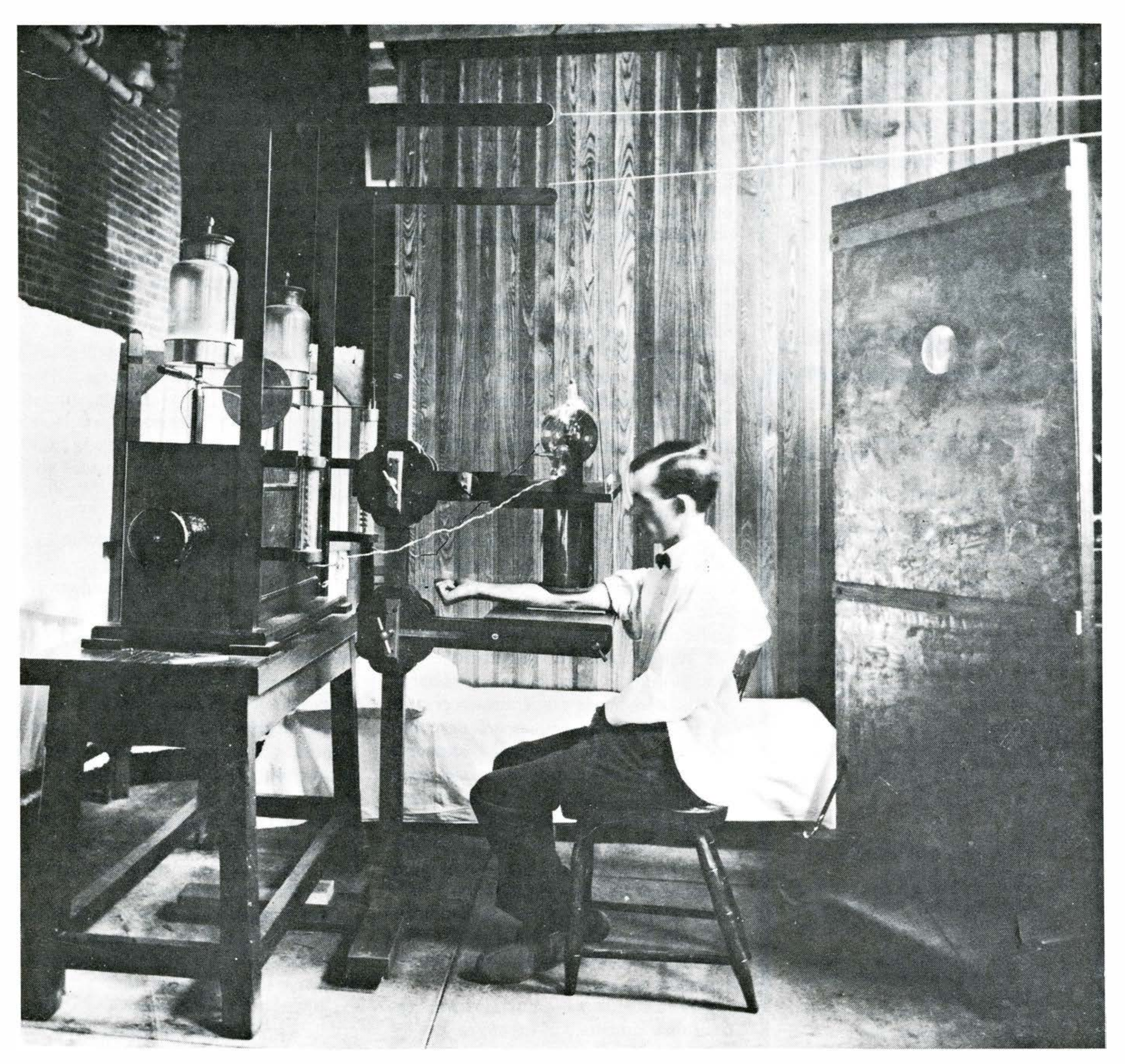
de que una afección fuese curable, demostrando con seguridad que no lo era.

En último extremo, la importancia del estetoscopio residía, por supuesto, en su precisión y seguridad, ya que permitía que meras hipótesis se convirtieran en diagnósticos ciertos. Tal como Laënnec y sus seguidores destacaron, tener seguridad en un diagnóstico significaba la posibilidad de un mejor tratamiento. Los remedios podían aplicarse pronto, a veces en las fases iniciales de la enfermedad. Incluso si la enfermedad era incurable, el paciente podía, al menos, ahorrarse una terapéutica inútil y quizá dolorosa.

La precisión de los diagnósticos realizados con el estetoscopio condujo a una creciente aceptación de la auscultación mediata. De hecho, una década después de la publicación de la *Auscultación mediata*, la popularidad de la técnica era tan grande, que un médico que no emplease el estetoscopio perjudicaba su reputación profesional. Algunos que no sabían auscultar lo llevaban solamente como mera ostentación. La exploración física con el estetoscopio era la nueva moda diagnóstica.

Durante la segunda mitad del siglo XIX, el estetoscopio rígido y monoaural de Laënnec experimentó numerosas mejoras. Se diseñaron modelos más pequeños destinados a los médicos a los que les molestaba transportar un objeto tan voluminoso. También se mejoraron las propiedades acústicas del instrumento, sustituyendo, por ejemplo, la cavidad parabólica por una cónica en la extremidad que se apoyaba en el tórax del paciente. En la temprana fecha de 1829, un médico de Edimburgo llamado Nicholas Comins construyó el primer estetoscopio que no era completamente rígido. El instrumento constaba de dos tubos de madera rígidos, cada uno de unos veinte centímetros de largo, unidos con una articulación que podía colocarse en cualquier ángulo. También podía girar un auricular adosado a uno de los tubos.

Los primeros estetoscopios monoaurales plenamente flexibles construidos con tubos plegables aparecieron en la década de los treinta. Tenían hasta un metro de largo y evitaban que los enfermos tuvieran que cambiar continuamente de postura durante la exploración, así como las molestias que suponía un instrumento rígido apretado contra el cuerpo. Además, con un estetoscopio flexible no era necesario que estuvieran tan cerca del médico; una mujer podía colocarse ella misma su extremo distal, de forma que el médico se mantenía a



APARATO DE RAYOS X PRIMITIVO, en una fotografía realizada en el Massachusetts General Hospital de Londres hacia 1910. Los rayos X se descubrieron en 1895 (en la misma época en la que se difundió el estetoscopio binaural y flexible) y pronto se aplicaron a diferentes tareas médicas, como el diagnóstico de las fracturas óseas y la localización de cálculos renales. Las afecciones pulmonares y cardíacas, en especial, pudieron ser casi siempre diagnosticadas más rápida y precisamente con los rayos X que con el estetoscopio. En consecuencia, los aparatos de rayos X comenzaron a sustituir al estetoscopio como principal instrumento para el estudio de las enfermedades torácicas. Durante el siglo XX, el estetoscopio ha resultado cada vez más desplazado por técnicas diagnósticas más complejas, tanto en la práctica clínica (el médico confía menos en sí) como en la enseñanza.

una distancia apropiada. De forma semejante, los médicos podían evitar la proximidad de pacientes con enfermedades contagiosas. También se ahorraban la molestia de inclinarse para explorar los enfermos (cosa de especial interés para médicos obesos) e incluso podían auscultarse a sí mismos.

Seguramente, Comins fue también el primero que ideó un estetoscopio binaural, con un tubo flexible para cada oído. No obstante, los primeros modelos que funcionaron de modo satisfactorio no se construyeron hasta comienzos de los años cincuenta. Al inventarse el micrófono en 1878, pareció factible una mayor amplificación de los sonidos somáticos, pero pronto se comprobó que los ruidos pulmonares y cardíacos recogidos con él no tenían suficiente claridad para los fines diagnósticos.

El entusiasmo inicial y la desilusión posterior en torno al micrófono coincidieron con la introducción de una gran diversidad de tipos de estetoscopio, lo que produjo mucha confusión. Los médicos comenzaron a rechazar cualquier amplificación que alterase los sonidos que estaban acostumbrados a oír en sus pacientes.

Muchos prefirieron ignorar la amplia serie de estetoscopios existentes, insistiendo que lo importante en la auscultación no era el diseño del instrumento sino la preparación del médico. En consecuencia, hasta los años noventa no se aceptó de modo general el estetoscopio binaural flexible, acústicamente superior y más fácilmente transportable. Poco después de 1900, los médicos comprobaron que una membrana colocada en

la extremidad distal del estetoscopio facilitaba la transmisión de ciertos sonidos, por lo que se añadió al instrumento. Los estetoscopios actuales siguen básicamente el mismo diseño y, generalmente, tienen dos extremidades distales: una acampanada y sin diafragma, destinada a los sonidos de tono más bajo, y otra más amplia y aplanada, provista de un diafragma, para los sonidos de tono elevado.

La aceptación del estetoscopio binaural coincidió paradójicamente con un descubrimiento que pronto lo desplazaría como principal recurso diagnóstico de las enfermedades torácicas. En 1895, W. K. Roentgen descubrió que un tubo de rayos catódicos emitía radiaciones que podían atravesar objetos sólidos e impresionar la imagen de la estructura interna de un cuerpo en una placa fotográfica. La noticia que dio Roentgen de estos rayos X, una "nueva clase de luz que lo atravesaba y lo fotografiaba todo", se difundió con rapidez. La radiografía que hizo de la mano de su esposa fue reproducida en publicaciones de todo el mundo y las revistas rivalizaron en editar informes exagerados acerca de las posibles aplicaciones del descubrimiento. La gente encargó ávidamente radiografías de las manos de sus seres queridos y también de objetos corrientes, como llaves, a través de recipientes opacos, como, por ejemplo un monedero. (La reina de Portugal mandó hacer radiografías de todos los miembros de la corte. El desplazamiento de la jaula torácica, que los rayos X descubrió en algunas mujeres, hizo que abandonaran sus ajustados corsés.)

Los médicos se entusiasmaron extraordinariamente con los rayos X y los utilizaron muy pronto para diagnosticar las fracturas óseas y los cálculos renales, así como para localizar en los tejidos orgánicos proyectiles y otros cuerpos extraños. Al mes siguiente de la publicación del descubrimiento, funcionaba un aparato que proyectaba el cuerpo de los enfermos en una pantalla fluorescente, de forma que el médico podía observar directamente los movimientos pulmonares y cardíacos. Cuando las técnicas radiológicas progresaron, fue posible estudiar alteraciones en partes blandas como el corazón y los pulmones.

Con los rayos X, los médicos pudieron diagnosticar las enfermedades torácicas y definir sus características con mayor precisión que con el estetoscopio. En 1896, Francis H. Williams, uno de los primeros radiólogos, expresó el punto de vista de muchos otros médicos con las siguientes palabras: "Podemos hoy observar lo que hasta ahora solamente habíamos podido suponer y a veces escuchar, aunque de modo imperfecto". La conversión de sonidos auscultatorios en imágenes en la mente del médico parecía, para muchos, menos fiabl que el análisis directo de los trastornos patológicos en las radiografías. Los enfermos también confiaban más en un diagnóstico basado en una lesión anatómica que podían ver en una placa. Comenzó a decaer el uso del estetoscopio, tendencia que se acentuó en el siglo XX con el desarrollo de técnicas diagnósticas más refinadas como, por ejemplo, la electrocardiografía. A medida que los médicos se han interesado por dichos métodos, han ido descuidando la exploración física y las técnicas creadas en el siglo XIX para realizarla.

En la actualidad, el estetoscopio es el arma médica tradicional por excelencia. Aunque no puede competir con la serie de técnicas complicadas y caras que lo han desplazado, se mantiene tenazmente, resistiéndose a desaparecer. Su permanencia se debe, en parte, a que proporciona a médicos y enfermos una sensación de continuidad con el pasado. Identificado con el diagnóstico seguro, es un objeto familiar que despierta confianza. Todavía más importante es que ofrece, a los médicos que todavía saben manejarlo bien, datos inmediatos y de bajo costo que pueden evitar pruebas diagnósticas complicadas.

Para el médico actual es más fácil, por supuesto, enviar a sus pacientes a un laboratorio clínico o a un departamento de rayos X que realizar una cuidadosa exploración con el estetoscopio. Dichas pruebas están habitualmente incluidas en los sistemas de seguridad social, de forma que significan pocos gastos inmediatos para el paciente y ahorran tiempo al médico. Además, como pocos médicos dominan métodos como la auscultación, la elección de la tecnología diagnóstica complicada es, cuando menos, prudente. Lo que se ha perdido, ante todo, es la confianza del médico en sí mismo. Cuando el médico del siglo XIX decidió basar sus diagnósticos, más que en los síntomas que contaba el paciente, en signos físicos que a menudo solamente él podía detectar, se obligó a formular sus propias concepciones acerca de las enfermedades. Como era médica, el siglo XX se caracteriza por ser un período en el que los médicos, para reunir y valorar datos semiológicos, confían menos en sí mismos y más en especialistas, técnicos y máquinas.

Juegos matemáticos

De la rectangulación de rectángulos y de otros muchos gratos problemas

Martin Gardner

Este mes, como ocasionalmente acostumbro a hacer, ofreceré una colección de problemas elementales y sin relación entre sí. Daré las correspondientes soluciones el mes próximo, así como algunas referencias bibliográficas pertinentes. En futuras colaboraciones analizaré cualesquiera "realimentaciones" emanadas de los lectores. Comenzaré con un delicioso problema combinatorio de origen desconocido. Me lo comunicó Robert Tappay, de Toronto, quien opina que el problema se originó en la Unión Soviética.

1. La mesa giratoria. Imaginemos una mesa cuadrada que pueda girar alrededor de su centro. En cada uno de sus ángulos hay un pozo profundo, y en el fondo de cada pozo, un vaso. El vaso puede encontrarse boca arriba o boca abajo. No podemos ver el fondo del pozo, pero sí palpar en su interior y averiguar si el vaso se encuentra en una u otra posición.

Se define una "jugada" como sigue. Se hace girar la mesa; cuando llegue a detenerse, se introducen las manos en pozos diferentes. La posición de los vasos se ajusta a capricho; es decir, éstos pueden dejarse tal cual están, invertirse la posición de uno de ellos, o de ambos.

Ahora se vuelve a girar la mesa, y para hacer la segunda jugada se repite el procedimiento. Cuando la mesa deja de girar, no hay manera de distinguir sus esquinas; así pues, el jugador tiene solamente dos alternativas: meter las manos en un par de pozos diagonalmente opuestos o en un par de pozos adyacentes. El objetivo de tales maniobras es conseguir que los cuatro vasos queden en idéntica posición, sea todos boca arriba o todos boca abajo. Cuando se consigue efectuar esta tarea suena un timbre, o una campanilla.

Al comenzar el juego, los vasos de los cuatro pozos se encuentran boca arriba o boca abajo, al azar. Si casualmente se encontraran los cuatro vueltos en la misma dirección al comienzo, sonaría inmediatamente el timbre, y el juego habría terminado sin necesidad de ningún movimiento. Por consiguiente, podemos suponer que inicialmente los vasos no están todos vueltos de idéntica forma.

¿Existe algún procedimiento que garantice que tras un número finito de jugadas llegará a sonar el timbre? Muchas personas, tras pensar un poco al respecto, llegan a la conclusión de que no existe un tal procedimiento. Es cuestión de probabilidad, suelen decir. Si se tiene mala suerte, es posible que sea necesario proseguir indefinidamente. Sin embargo, no ocurre así. Es posible garantizar que la campana sonará no más tarde de n jugadas. Pero, ¿cuál es el valor mínimo de n, y cuál es el procedimiento que con certeza hará sonar el timbre en n o menos movimientos?

Imaginemos una mesa con sólo dos ángulos, y por tanto, sólo dos pozos. En este caso es evidente que con un movimiento se hará sonar el timbre. Si hubieran tres pozos (situados en los vértices de una mesa triangular), los dos siguientes movimientos bastarían para resolver el problema:

(1) Elíjase un par de pozos, no importa cuál. Si los dos vasos están vueltos en igual dirección, se invierten ambos, con lo que sonará la campana. Caso de estar apuntando en direcciones distintas, se invierte el vaso que está boca abajo. Si la campana no sonase entonces, se procede así:

(2) Se gira la mesa, y a su detención se elige un par cualquiera de pozos. Si ambos vasos están boca arriba, se invierten ambos, y sonará el timbre. Si están vueltos en distintas direcciones, se invierte el vaso colocado boca abajo, y sonará el timbre.

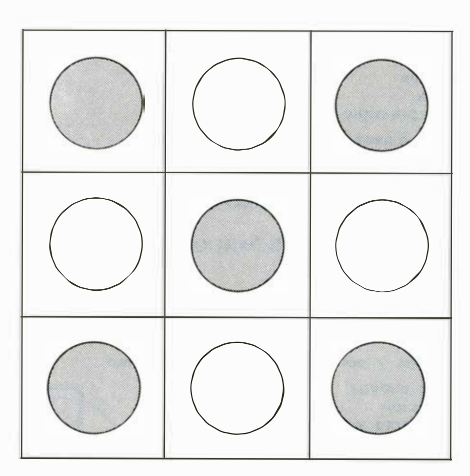
Aunque el problema puede resolverse en un número finito de pasos cuando hay cuatro pozos y cuatro vasos, resulta que si hay cinco o más vasos (situados en los vértices de mesas pentagonales o de mayor número de lados), no existen procedimientos que garanticen la terminación en n jugadas. Daré el mes que viene una solución para el problema con cuatro vasos, y examinaré algunas generalizaciones del problema debidas a Ronald L. Graham y a Persi Diaconis.

2. Turnablock. El libro de John Horton Conway titulado *On Numbers and Games* (véase esta sección en el número de noviembre de 1976) no sólo abrió nuevos caminos: le trajo también un aluvión de cartas sugiriéndole nuevos juegos que podrían ser analizados mediante sus notables métodos. Una de tales sugerencias, debida a H.N. Lenstra, de Amsterdam, llevó a Conway a imaginar una nueva familia de juegos, entre los cuales, el que Conway bautizó "turnablock" es uno de los mejores.

El turnablock se juega sobre un damero cualquiera, de dimensión n por n, utilizando n^2 fichas cuyas caras sean de distintos colores, pudiendo muy bien servir las fichas de "reversi" o fabricarse pegando dos fichas de póker. Por comodidad, llamaremos a tales colores "blanco" y "negro". Describiré aquí tan sólo la versión no trivial más simple de este juego, que se desarrolla sobre un tablero de tres por tres; el mes que viene discutiré otras versiones más generales debidas a Conway.

Al comienzo del juego, las fichas pueden estar en una disposición cualquiera; mas, para los fines del problema, supondremos que están colocadas con alternancia de colores, como se ve en la ilustración de esta página. En cada jugada, el jugador de turno invierte todas las fichas de un bloque rectangular de dimensión a por b, donde a y b son dos enteros cualesquiera comprendidos entre 1 y 3. Así pues, el bloque de un jugador puede estar formado por una sola pieza, por un "dominó" de uno por dos (orientado vertical u horizontalmente) o por cualquier otra configuración mayor, cuyo caso extremo sería el tablero completo de tres por tres.

En el turnablock hay que respetar una regla fundamental: para poder dar la vuelta a un bloque, es necesario que su ángulo inferior derecho sea una ficha

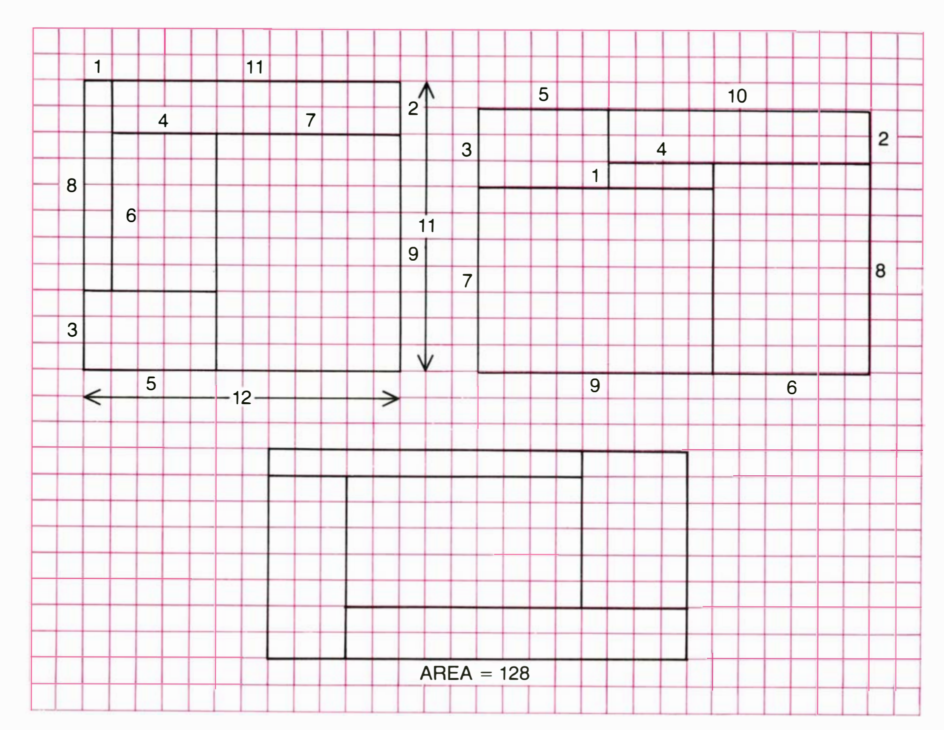


El juego de turnablock

negra. Se supone que ambos jugadores están sentados a un mismo lado del tablero. De estar sentados frente a frente, uno de ellos ha de obedecer la regla anterior, y el otro, para poder voltear un bloque, ha de ver una pieza negra en el ángulo superior izquierdo de *su* bloque. Los jugadores actúan por turno; llegada su vez, cada jugador tiene necesariamente que voltear un bloque. El jugador que, al terminar su jugada, consiga dejar todas las fichas vueltas con la cara blanca hacia arriba, gana la partida. La regla anterior garantiza que todas las fichas llegarán a quedar con la cara blanca hacia arriba, y que la partida tendrá fin. Con la colocación de la figura el primer actuante puede ganar siempre, con tal de jugar correctamente. ¿Cuáles son los primeros movimientos que le conducen al triunfo, y cuál es la estrategia vencedora?

3. Persistencia de los números. N.J.A. Sloane, de los Bell Laboratories, autor de una valiosa obra de consulta titulada *A Handbook of Integer Sequences,* ha introducido en la teoría de números el concepto de "persistencia" de un número. La persistencia de un número es el número de pasos necesarios para reducirlo a un único dígito por el siguiente procedimiento: se efectúa el producto de los dígitos del número, con lo que se obtiene un segundo número; seguidamente, se multiplican los dígitos de éste, con lo que se obtiene un tercer número, continuándose de este modo hasta llegar a un número de un solo dígito. Por ejemplo, 77 tiene persistencia "cuatro", porque, para reducirlo, son precisos 4 pasos: 77 ⟶ 49 ⟶ 36 ⟶ 18 ⟶ 8. El número mínimo de persistencia 1 es 10; el mínimo de persistencia dos es 25, el mínimo de persistencia tres es 39, y el mínimo de persistencia cuatro, 77. ¿Cuál es el mínimo número de persistencia cinco?

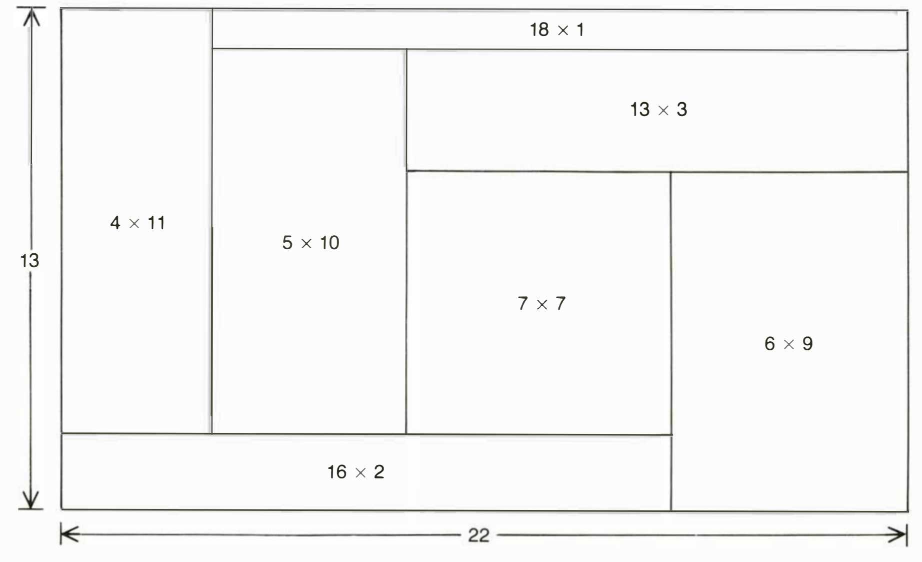
Con auxilio de ordenador, Sloane ha conseguido comprobar que ningún número menor que 10^{50} tiene persistencia mayor que 11, y ha enunciado una conjetura: que existe un número *c* tal que ningún otro número tiene persistencia mayor que *c*. Apenas se sabe nada acerca de la teoría de persistencia en bases distintas de la decimal. Cuando se usa la base dos, la máxima persistencia es, evidentemente, uno. Al operar en base tres, el segundo término de la sucesión de persistencia de cualquier número es o bien igual a cero o bien igual a una potencia de 2. Sloane ha conjeturado que, en base tres, todas las potencias de 2 mayores que 2^{15} contienen un cero. Los cálculos realizados muestran que la conjetura de Sloane es verdadera



Rectangulación de rectángulos

hasta 2^{500}, pero no se dispone de demostración formal de la propiedad. Evidentemente, todo número que incluya al cero entre sus cifras se reduce a cero en la etapa sucesiva. Por consiguiente, si la conjetura fuese cierta, resultaría que la máxima persistencia en base tres es precisamente tres, como queda puesto de manifiesto por la sucesión siguiente: 222. 222. 222. 222. 222 ⟶ 2^{15} (que escrito en base tres tiene la expresión 1.122.221.122) ⟶ 1.012 ⟶ 0. Sloane ha conjeturado también que cualquiera que sea la base *b* que se utilice hay un número *c* (que depende de la base) tal que ningún número escrito en base *b* tiene persistencia mayor que *c*.

Llamaremos a la persistencia en sentido de Sloane "persistencia multiplicativa", para diferenciarla de la persistencia aditiva, término introducido por Harvey J. Hindin, tras conocer el trabajo de Sloane. La persistencia aditiva de un número es el número de pasos requeridos para reducirlo a un solo dígito por adiciones sucesivas. Tanto los contables como los aficionados a las matemáticas recreativas conocen ya este proceso, que suele llamarse "sacar los nueves", o "prueba de los nueves", y a veces, "obtención de la raíz digital de un número", procedimientos equivalentes todos ellos a la reducción del número por módulo nueve. Por ejemplo, 123.456.789 tiene



Mínimo rectángulo que puede embaldosarse con rectángulos no comparables

persistencia aditiva igual a dos: 123.456.789 → 45 → 9.

A diferencia de la persistencia multiplicativa, la persistencia aditiva es relativamente trivial, y casi todo lo concerniente a ella, conocido. Por ejemplo; en base dos, el mínimo número de persistencia aditiva igual a cuatro es 1.111.111. En base tres, el número en cuestión es 122.222.222. ¿Cuál es en base 10 el mínimo número de persistencia aditiva igual a cuatro?

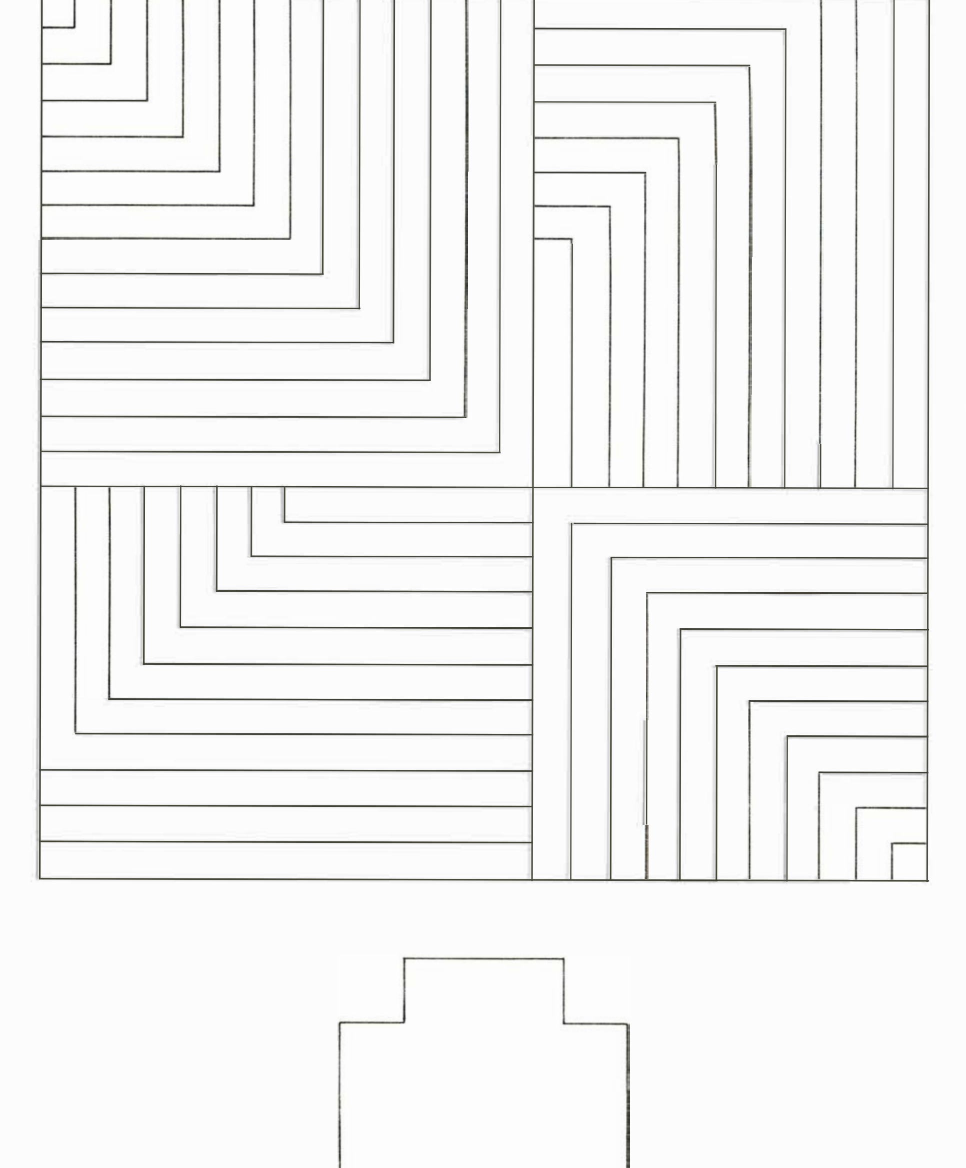
4. Rectangulación del rectángulo. Hay un clásico problema de disección conocido por "cuadriculación del cuadrado": ¿Es posible descomponer un cuadrado en un número finito de cuadrados más pequeños, de manera que no haya dos cuadraditos de igual tamaño? La solución de este problema fue analizada en un artículo escrito por William T. Tutte, especialista en teoría de grafos para esta sección (SCIENTIFIC AMERICAN, noviembre, 1958) y reproducido en mi *2nd Scientific American Book of Mathematical Puzzles & Diversions.* En aquel entonces, la mejor solución conocida requería 24 cuadrados. (Solución óptima es la formada por el mínimo número de cuadrados.) En 1978 esta cifra fue rebajada a 21 por el matemático holandés A.J.W. Duijvestijn, y así lo informó INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (agosto 1978, página 47, "El cuadrado pluscuamperfecto"). Se sabía ya que no podían existir soluciones de menos de 21 cuadrados; Duijvestijn no sólo encontró una solución sino que pudo demostrar que su modelo de descomposición con dicho número de cuadrados es único. Más recientemente, ha encontrado dos cuadrados cuadriculados en 22 cuadraditos, y también la solución óptima, de nuevo con 22 cuadrados, para cuadricular el dominó (rectángulo que tiene un lado doble del otro).

Un problema que presenta aspectos semejantes consiste en descomponer un rectángulo no cuadrado en el número mínimo de rectángulos menores, de manera que ningún par de lados de ningún par de rectángulos de la descomposición sea de igual longitud. No es difícil demostrar que el mínimo número de rectángulos interiores tiene que ser cinco. Añadamos ahora la condición de que todos los lados de los seis rectángulos (contado el exterior) sean números enteros. Scott Kim ha conseguido demostrar que no es posible ninguna solución que utilice los doce enteros de 1 hasta 12 para las longitudes de los doce diferentes lados, aunque, casi, casi La figura que se muestra en la esquina superior izquierda de la ilustración superior de la página anterior es una solución de Kim que usa 11 dos veces y en cambio no incluye la longitud 10. Si no se tienen en cuenta los lados del rectángulo exterior, el problema se resuelve con los enteros consecutivos de 1 a 10, como ha demostrado Graham con el rectángulo que se muestra en la esquina superior derecha de la misma ilustración.

La figura que se muestra en la parte baja de la misma ilustración ha sido tomada de *Mathematical Puzzles* (G. Bell and Sons, Ltd. 1977, p.59), recopilación de problemas de gran interés debida a Stephen Ainley. En ella se presenta una de las dos posibles soluciones que tienen distintos los 12 lados, que, si bien no corresponden a enteros consecutivos, poseen la propiedad de determinar un rectángulo exterior de tan sólo 128 unidades de superficie. Ainley afirma que el rectángulo exterior de esta superficie es mínimo, aunque no da demostración.

Relajemos un poco las condiciones, exigiendo solamente que los 10 distintos lados de los cinco rectángulos interiores sean enteros diferentes. ¿Qué solución determina un rectángulo exterior de superficie mínima? El primero en resolver este problema fue C.R.J. Singleton, quien me la comunicó en 1972. Hay tan sólo una solución. ¿Sabrá encontrarla el lector?

Un problema más difícil, aunque íntimamente relacionado con los anteriores, fue propuesto por Edward M. Reingold en *The American Mathematical Monthly* (vol. 80, n.º 6, junio-julio 1973, p. 691, Problema E2422), y consiste en hallar el mínimo rectángulo que puede ser descompuesto en rectángulos no compara-



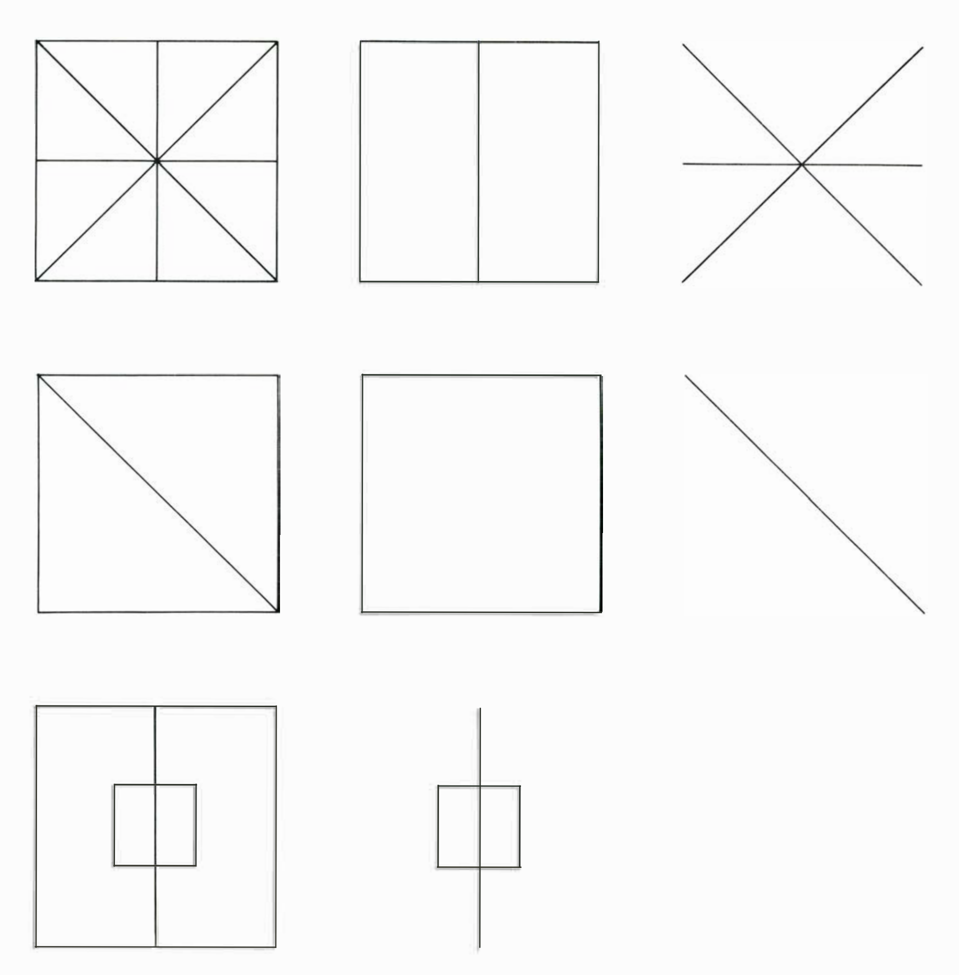
Trazar la forma de la figura pequeña dentro de la grande

bles. Se publicó una solución de este problema en la revista mencionada, un año más tarde (vol. 81, n.º 6, junio-julio, 1974, páginas 664-666). Se dice que dos rectángulos son no comparables cuando ninguno de ellos puede colocarse dentro del otro de forma que los correspondientes lados sean paralelos. Reingold, Andrew C. Yao y Bill Sands, en el artículo "Tiling with Incomparable Rectangles" (*Journal of Recreational Mathematics*, vol. 8 n.º 2, 1975-76, págs. 112-119), demuestran numerosos teoremas sobre este problema.

El mínimo número de rectángulos no comparables necesarios para embaldosar un rectángulo mayor que los dados es siete. Si todos los lados han de tener longitudes enteras, el rectángulo exterior de mínima superficie y mínimo perímetro es el de 22 por 13, que se muestra en la ilustración inferior de la página 103. Fue descubierto por Sands. La condición necesaria para poder pavimentar un cuadrado mediante siete rectángulos no comparables, cuyos lados sean números enteros, es que tenga lado 34 o mayor. En cambio, con ocho rectángulos se puede embaldosar un cuadrado de lado 27. Tal cuadrado es el mínimo conocido embaldosable mediante rectángulos no comparables, pero no se ha podido demostrar que sea el mínimo posible. Pueden verse los detalles en el artículo de Reingold, Yao y Sands.

En 1975, fue generalizado a tres dimensiones el problema de rectangulación del rectángulo –primero de los anteriores– por Scott Kim. Existe una elegante demostración de la imposibilidad de descomponer un cubo en cubos menores entre los cuales no haya dos iguales. (Véase mi *2nd Scientific American Book of Mathematical Puzzles and Diversions*, p. 208.) ¿Puede descomponerse un cubo en "cajas" más pequeñas (paralepípedos rectangulares, o sea, ortoedros) de forma que ningún par de cajas tengan dos lados de la misma longitud? La respuesta es afirmativa; Kim pudo demostrar que el mínimo número de cajas interiores es 23. Posteriormente, William H. Cutler ha construido una segunda demostración del carácter mínimo de 23, pero ni Kim ni él han hecho públicas sus demostraciones. Cutler encontró 56 formas esencialmente distintas de cortar un cubo en cajas. Sin embargo, no se conoce todavía el mínimo cubo de arista entera que puede descomponerse en cajas de aristas enteras.

Otro problema aún pendiente consiste en determinar la caja no cúbica de mínimo volumen que puede descomponerse en 23 o mayor número de cajas de lados de longitudes todas enteras y dos a dos distintas. Cutler encontró una caja de 147 por 157 por 175 que se descompone en las siguientes 23 cajitas:

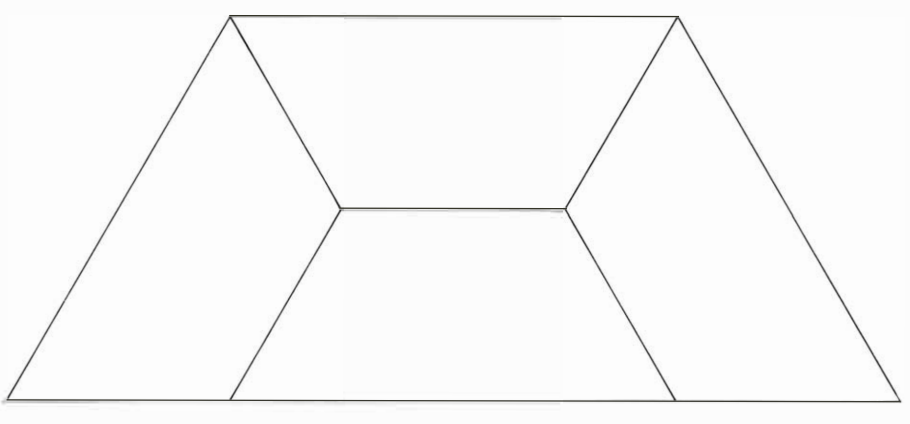


Hallar la regla

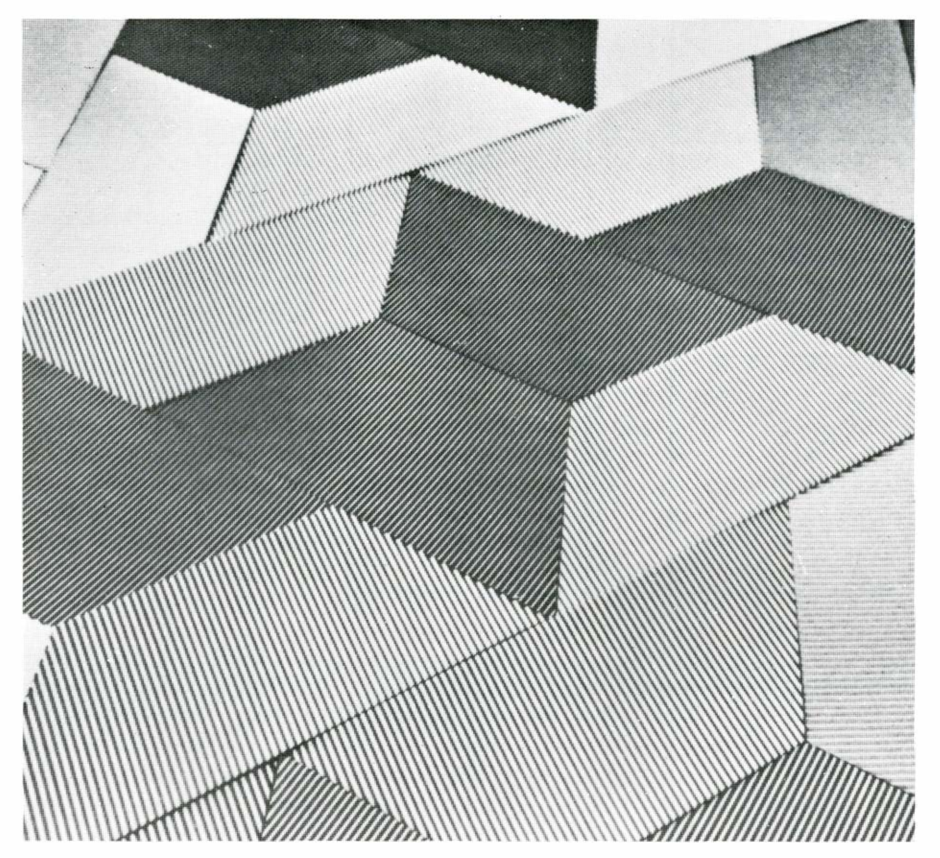
13 por 112 por 141	27 por 36 por 48
18 por 72 por 82	34 por 110 por 135
23 por 41 por 73	57 por 87 por 97
31 por 69 por 78	16 por 74 por 140
38 por 42 por 90	21 por 52 por 65
14 por 70 por 75	28 por 55 por 123
19 por 53 por 86	35 por 62 por 127
26 por 49 por 56	17 por 24 por 67
33 por 46 por 60	22 por 107 por 131
45 por 68 por 85	30 por 54 por 134
15 por 44 por 50	37 por 83 por 121
20 por 40 por 92	

No es cosa sencilla encajar todas estas cajitas en la caja grande. Y que yo sepa, todavía nadie ha trabajado en versiones tridimensionales del problema de los rectángulos no comparables de Reingold.

5. Tres rompecabezas geométricos. (1) El rompecabezas que se reproduce en la ilustración de la página anterior se ha tomado del número de septiembre-octubre de la revista *Games*, interesante publicación bimensual, llena de colorido, que va ya por su tercer año de existencia. (Para suscripciones, escribir a *Games*, 515 Madison Avenue, New



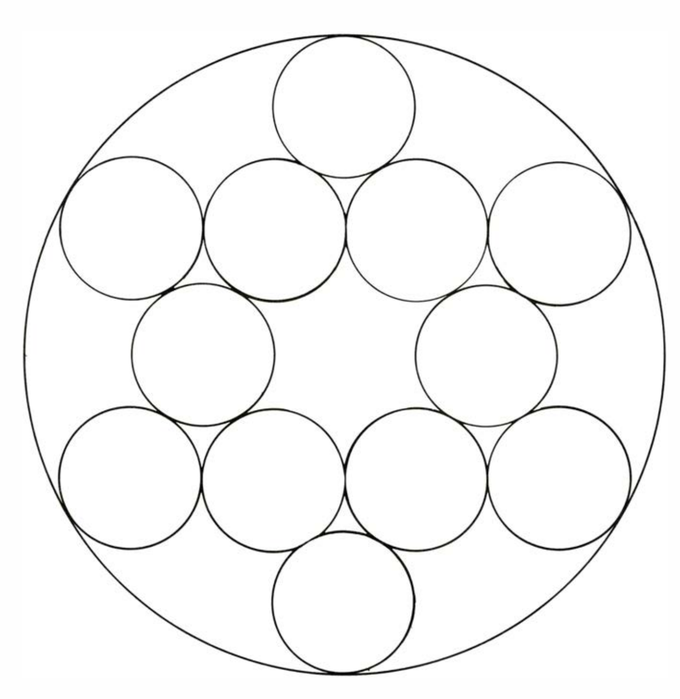
Hágalo de otra forma



Detalle de la pavimentación de 174 triamantes, de Denis McCarthy

York, N.Y. 10022). El problema consiste en trazar dentro de la figura grande una figura geométricamente semejante a la pequeña dibujada bajo la anterior.

(2) El rompecabezas que se ve en la ilustración superior de la página anterior procede de un número especial de la revista francesa *Science et Vie* (septiembre de 1978), enteramente dedicado a matemática recreativa. En cada fila, la tercera configuración resulta de las dos primeras por aplicación de una cierta regla de transformación. ¿Cuál es la regla, y cuál sería la configuración que debería ocupar el espacio en blanco de la tercera fila?



Solución al "secreto del envasador"

(3) El trapezoide que se ve en la ilustración inferior de la página anterior se llama "triamante", porque puede formarse uniendo tres triángulos equiláteros. En una exposición que tuvo lugar el año pasado en la 55 Mercer Gallery de Nueva York, Denis McCarthy exhibió una llamativa teselación formada por 174 piezas de esta forma. Estaban construidas de cartón ondulado; al incidir oblícuamente la luz sobre ellas, sus superficies acanaladas creaban diseños de triamantes claros y obscuros, variables con la posición del observador [*véase la ilustración superior de esta misma página*].

Un antiguo rompecabezas pide descomponer el triamante en cuatro piezas congruentes. La ilustración inferior de la página precedente presenta la solución tradicional. Richard Brady, profesor de matemáticas en Washington D.C., me contó que uno de sus alumnos, de nombre Andrew Miller, encontró el problema en la *Geometry* de Harold R. Jacobs (W.H. Freeman and Company, 1974, p. 188), y, al estudiarlo, descubrió una nueva solución. En la nueva solución de Miller, no todas las cuatro regiones tienen la misma forma que la figura grande, pero sí resultan idénticas si una o más pueden ser vueltas del revés. ¿Cuál es la nueva solución?

La solución al "secreto del envasador", viejo rompecabezas francés que describimos el mes pasado, se muestra en la ilustración inferior de la izquierda. Para realizar el rompecabezas es conveniente comenzar con una moneda en el centro; tras colocar a su alrededor otras 11 más, la moneda central, puede colocarse en el canto.

Al hablar el pasado mes de octubre sobre anillos prismáticos retorcidos dije que la única fuente de referencia en inglés era un artículo de 1972, al menos que yo conociese. H.T. McAdams me ha enviado un ejemplar de su nota "The Sieve of Eratosthenes and the Möbius Strip" *(The American Mathematical Monthly,* vol. 55, n.º 5, mayo, 1948, págs. 308-309), donde se examinan brevemente tales anillos, probablemente por vez primera. Poco tiempo después, la tabla de números de McAdams, que relaciona las propiedades de los anillos con la clásica criba para generar la sucesión de números primos, apareció en la portada de *The Fantopologist,* una "fanzine" de ciencia ficción. Es posible que Theodore Sturgeon recibiera de dicha tabla la idea que le inspiró su cuento de 1949 "What Dead Men Tell", que mencioné al final de mi sección del mes de febrero último.

Taller y laboratorio

Una extraña relación: las chimeneas y las puntas de los lápices se fracturan de la misma forma

Jearl Walker

La relación entre el derrumbamiento de una chimenea y la rotura de la punta de un lápiz está muy lejos de ser evidente. A pesar de lo cual vamos a dedicar la mayor parte del artículo de este mes a demostrar que existe una similitud muy clara entre ambos hechos. En el resto de la sección acometeremos un tema muy distinto: un ingenioso montaje para acoplar un telescopio a una calculadora de bolsillo, de manera que los cambios de ángulo del telescopio se reflejen en la calculadora, y así podamos leer directamente en la pantalla de la misma el ángulo a que está orientado el telescopio en cada momento.

Si el lector presenciara alguna vez el derribo de una vieja chimenea (de las altas, autosustentadas y del tipo cilíndrico), le sugeriría que se fijase con detalle en uno de los lados en el momento en que la torre empiece a caer. En los métodos normales de demolición, se rompe una sección de la base con dinamita o bien con un bulldozer, forzando a la torre a caerse hacia un lado. Cuando haya alcanzado una inclinación de unos 45 grados, aparecerá probablemente una grieta lateral en su mitad. Como consecuencia, la parte de arriba comienza a descender más lentamente que la parte de abajo, y las dos forman más o menos una *V* abierta. La razón de la fractura se debe a que, conforme la chimenea empieza a caer, la parte superior tiene necesariamente una aceleración hacia el suelo mayor que la parte de abajo. Las chimeneas no suelen ser tan resistentes como para soportar, a la vez, la tensión de flexión y la aceleración; por tanto, se rompen.

Ernest L. Madsen, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Wisconsin, ha examinado recientemente la mecánica del derrumbamiento de una chimenea. Analizó en primer lugar las fuerzas que actúan sobre toda la torre, una vez iniciada la demolición. Dichas fuerzas son tres: su propio peso (que actúa en el centro de masas), una fuerza de reacción hacia arriba procedente del terreno y una fuerza de fricción (horizontal) procedente también del terreno. La combinación de estas fuerzas determina que la chimenea acelere su movimiento hacia el suelo y gire verticalmente sobre la base.

Madsen considera luego la sección inferior de la chimenea, que abarca desde la base hasta un punto arbitrariamente situado a lo largo de su longitud. Esta sección tiene una aceleración angular alrededor de la base durante toda la caída, debido a que actúan sobre ella tres momentos. Uno de los cuales tiene su origen en el propio peso de la sección. Los otros dos se deben a que la sección inferior tiene que arrastrar, en su rotación, a la sección superior; de estos dos momentos, uno se debe a las fuerzas de cizallamiento resultantes cuando la sección superior intenta deslizarse sobre la parte superior de la sección inferior. Por último, la sección inferior está sometida a un momento flector, ya que la parte superior tiende a retrasarse en la rotación y, por tanto, a doblarse hacia atrás.

Exceptuando la base y la cima de la chimenea, toda sección inferior, cualquiera que sea su longitud, estará sometida a la acción de un momento flector que forzará la separación entre la sección superior e inferior. De acuerdo con los cálculos, el momento flector es máximo a una altura de un tercio de la longitud total de la chimenea. Cuando ésta comienza a caer y a depender de una aceleración angular alrededor de la base, los momentos flectores a lo largo de toda su longitud van haciéndose progresivamente mayores en función del tiempo; puede llegarse a que dicho momento, a la altura de un tercio de la longitud, sea lo suficientemente grande como para romper la chimenea, de suerte que los dos tercios superiores se separen y retrasen respecto al tercio inferior.

Los resultados de Madsen se cumplen en una chimenea uniformemente cilíndrica. En una chimenea en la que su sección disminuya con la altura, o tenga cualquier otra forma, el máximo del momento flector no se encontrará a un tercio de la altura, sino en cualquier otro punto de su longitud. Si se le presenta la ocasión de ver el derrumbamiento de una chimenea, intente fotografiarlo. Puede resultar de particular interés filmar el movimiento a cámara lenta; podrá contemplarse así la grieta que comienza a aparecer en la parte inferior y se va propagando a lo ancho de la chimenea. (Hay que estar muy alerta. Recientemente presencié un derrumbamiento del tipo que estamos estudiando y por poco me alcanzan los ladrillos que salieron despedidos cuando la chimenea llegó al suelo.)

La grieta no se propaga directamente a través del ancho de la chimenea. En 1940, Francis P. Bundy explicó el proceso de ruptura, no sólo como consecuencia de la tensión flectora, sino también por el acompañamiento de la compresión de la chimenea sobre el lado que tira del resto. Según parece, la flexión provoca que la línea de máxima compresión descienda a medida que la grieta se propaga por aquel lado.

Algunos cálculos de Bundy sugieren que si una chimenea no se rompiera durante su caída, ocurrirían cosas realmente extrañas. La base de la chimenea podría saltar hacia arriba, casi al final de la caída, dado que la torre está rotando aproximadamente sobre su centro de gravedad. Pero estos resultados no son los previsibles en los cálculos de Madsen. Quizás el lector quiera observar la base de una chimenea que está cayendo sin romperse, para comprobar realmente si su base se eleva.

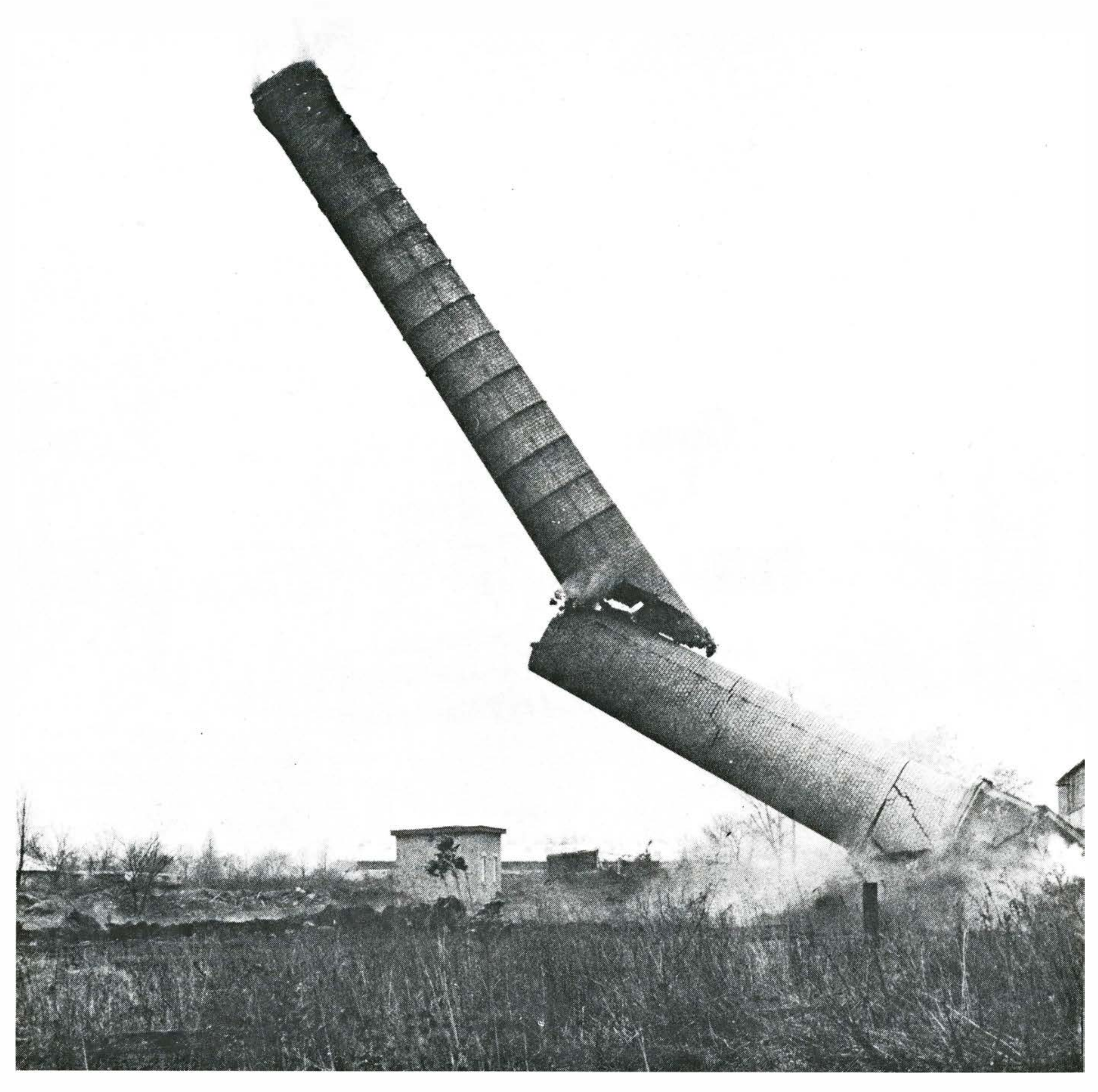
La demolición de una chimenea puede revelarnos otros dos aspectos interesantes. Se trata el primero de otro punto de ruptura, el cual puede desarrollarse cerca de la base en virtud del cizallamiento que provoca la parte superior de la chimenea al pretender deslizarse sobre la parte inferior. Algunas fotografías de derrumbamiento de chimeneas muestran con claridad esa nueva fractura; la torre se rompe por dos sitios.

El otro aspecto a destacar se refiere a la base de la chimenea; ésta puede deslizarse durante la caída. Había supuesto que dicho deslizamiento ocurría en dirección opuesta a la caída; pero la realidad suele ser diferente. La base se mueve en la misma dirección que la chimenea, siendo arrastrada a lo largo de dicha dirección cuando la chimenea está en una posición en la que su vector cantidad de movimiento ha adquirido una cierta componente longitudinal. De acuerdo con los trabajos de Madsen, hay más probabilidad de que la base se deslice cuando la chimenea haya recorrido en su caída por lo menos 50 grados. Mas allá de este ángulo, la cantidad de fuerza de rozamiento que sería nece-

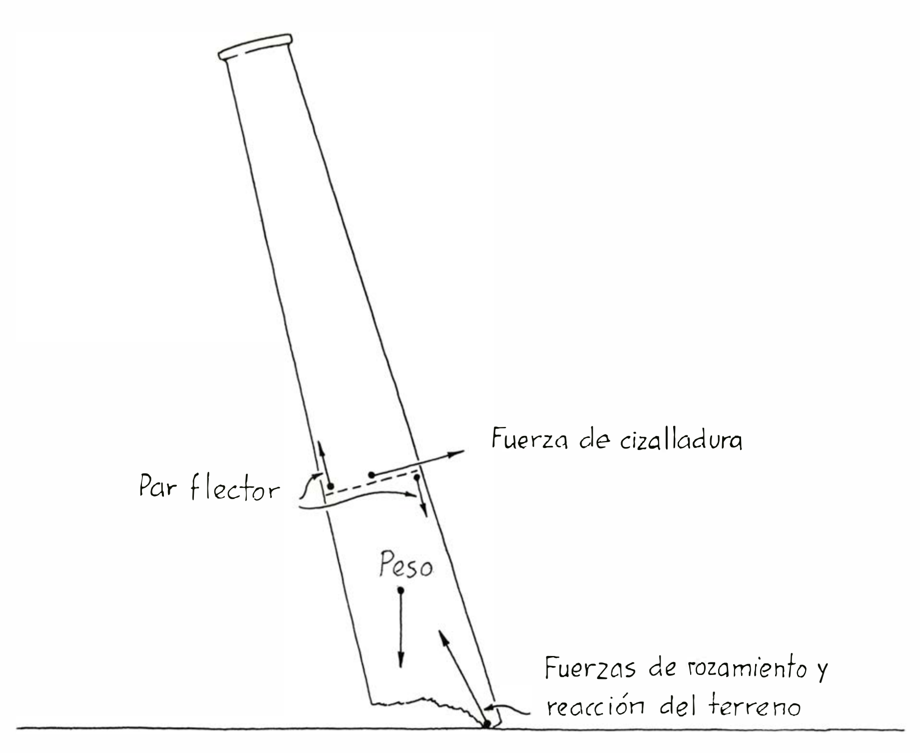
saria para afirmar la base en su sitio resultaría prácticamente infinita.

El derrumbamiento de una chimenea puede representarse, con algunas imperfecciones, por un lápiz sin afilar, situado verticalmente, con la punta hacia abajo, sobre una superficie horizontal, al que dejamos caer. El extremo inferior quedará desplazado en la dirección en que cae el lápiz, aunque este movimiento es más complejo que un simple resbalón. Dicho extremo recorre primero un breve intervalo en dirección opuesta a la de caída; puesto que el lápiz rebota sobre la superficie, el extremo da un salto todavía mayor en la dirección de caída. El rozamiento estático sobre el extremo inferior del lápiz no basta para impedir que dicho extremo se deslice a lo largo de la superficie a medida que el lápiz tiende a girar sobre su centro de gravedad durante su caída. El último movimiento en la dirección de la caída proviene de que el extremo inferior es arrastrado en dicha dirección cuando el lápiz en su caída adquiere un momento cinético horizontal.

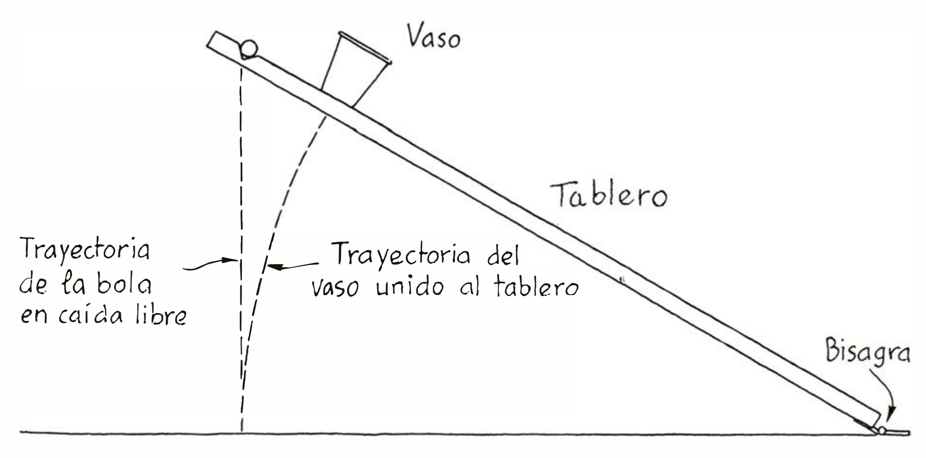
Madsen me ha sugerido un montaje muy simple con piezas sueltas (como las de muchos juguetes de construcción de casas y castillos), con el que simular la flexión de una chimenea al derrumbarse. Hay que reunir piezas cilíndricas de madera con un agujero en el medio. Para simular bien una chimenea, es necesario formar una torre con una treintena de las piezas referidas. Se ajusta estrechamente un palito al agujero central de una de las piezas, que será la que quede en la base. Se afila un extremo del palito para que pueda clavarse firmemente en un trozo de esponja, que colo-



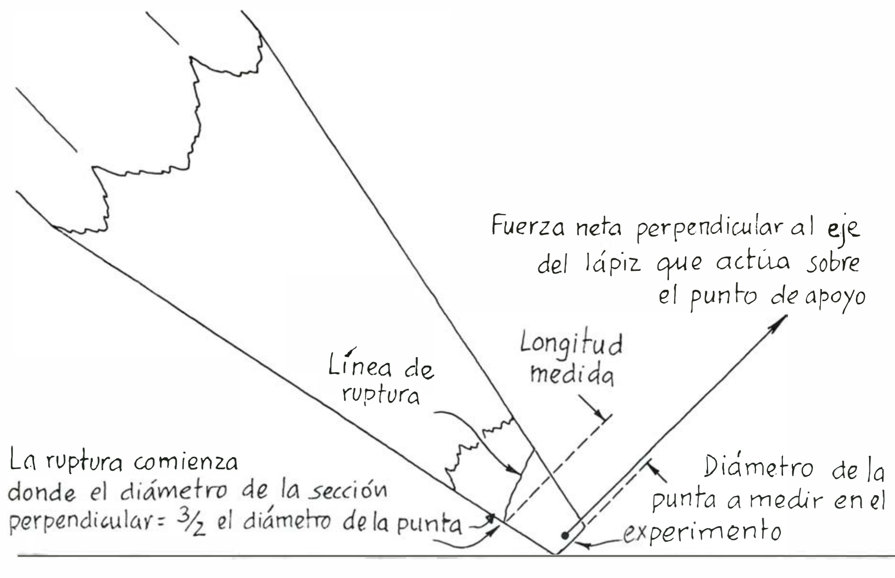
Una chimenea se rompe al caer



Fuerzas que actúan sobre la sección inferior de la chimenea durante el derrumbamiento



Aparato para demostrar el efecto de la aceleración durante la caída



Fuerzas que hacen que la mina de un lápiz se rompa

caremos sobre la mesa. Del otro extremo del palito, que quedará hacia arriba, ataremos una banda elástica, a ser posible de látex, que a su vez la haremos pasar a través de los agujeros centrales de las piezas. Quizás se requieran varias bandas de éstas, enlazadas entre sí, para alcanzar la cima de la chimenea. Atemos la última banda a otro palo, más pequeño, que cruzaremos encima de la pieza cilíndrica situada en la parte superior de la columna. Los cilindros deben quedar alineados para que la "chimenea" se mantenga derecha; no debe enredarse la banda de goma por dentro de los cilindros. Ajustaremos la tensión de la banda para que se incline la chimenea, si se le empuja por uno de los lados.

El extremo inferior del palito está clavado en la esponja; ésta, a su vez, se halla pegada, o unida de alguna otra manera, a un tablero mayor colocado encima de la mesa. Cuando empujamos suavemente la chimenea por un lado, cae torciéndose hacia atrás, más o menos como lo haría una chimenea real. La base no se desliza, debido a la fuerza de fricción existente entre el palito y la esponja.

Como el derrumbamiento es bastante rápido, una fotografía de la caída resulta más representativa y útil que la mera observación. Madsen sugiere que, si se toma una película de la caída, se haga por lo menos con una velocidad de 36 exposiciones por segundo. Si no se dispone de un equipo idóneo, puede sacarse una instantánea de la chimenea al caerse con una luz de estroboscopio. Apague la luz de la habitación, abra el objetivo de la cámara, haga que la chimenea empiece a caer y entonces encienda la luz de estroboscopio durante la caída. Después, y antes de encender la luz de la habitación, cierre el objetivo de la cámara.

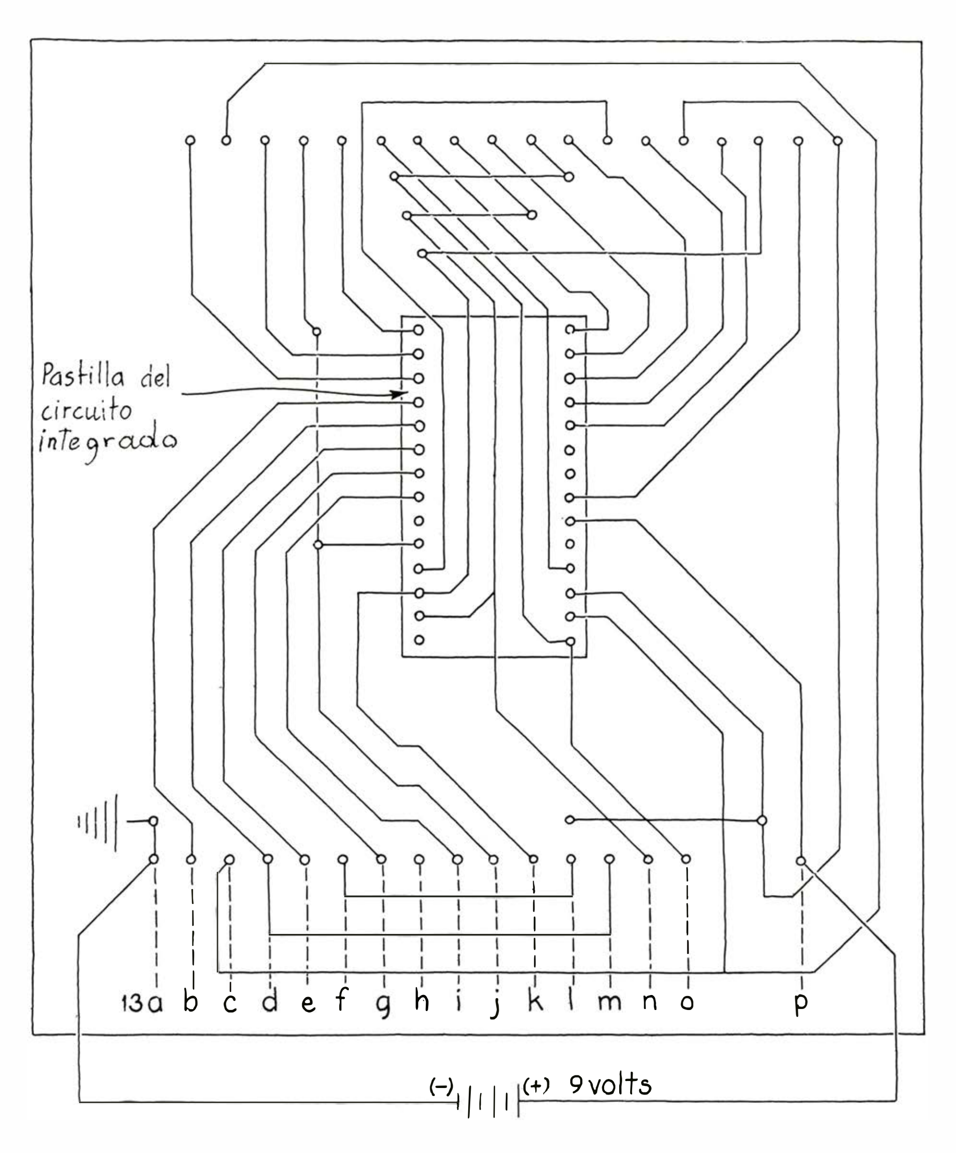
En las clases prácticas de física se da una demostración relacionada con el derrumbamiento de las chimeneas; constituye un ejemplo ilustrativo de cómo la gran aceleración de la parte superior de la chimenea impide su agrietamiento. Se une un tablero por medio de unas bisagras a una base, instalada sobre la mesa. El otro borde del tablero se mantiene en alto por medio de un soporte, de suerte que el tablero forme un ángulo de unos 35 grados con la mesa. Se pega un pequeño vaso de papel en la parte superior del tablero, cerca de su borde. Más cerca todavía del borde, y en un soporte, se coloca una bola metálica pequeña. El soporte puede consistir en una breve ranura abierta en el tablero. La situación correcta de estos elementos debe ser tal que cuando se retire el soporte, la bola se separe del tablero (ya que la acelera-

ción con la que desciende el tablero es mayor) y caiga dentro del vaso de papel.

Podría esperarse que la bola y el tablero cayeran con la misma velocidad; en cuyo caso, ambos alcanzarían la mesa a la vez y, por tanto, la bola nunca caería dentro del vaso. Pero, en cuanto se retire la varilla de apoyo, la bola adquirirá un movimiento de caída libre. Es decir, comienza a caer con un movimiento uniformemente acelerado, con la aceleración normal de la gravedad, que tiene un valor de unos 9,8 metros por segundo cada segundo. El tablero, por su parte, está sometido a una aceleración angular alrededor de la bisagra, ya que su propio peso crea un par que actúa sobre el centro de masas. Este movimiento hace que el borde superior del tablero se mueva hacia abajo con una aceleración mayor que la que provoca la gravedad. Esta aceleración no dependerá de la longitud del tablero (ya que el centro de gravedad se hallará siempre en el punto medio, cualquiera que sea su longitud, y el par provocará la misma aceleración en el borde superior); sí dependerá, en cambio, del ángulo que forme el tablero con el plano de la mesa. Conforme el tablero cae y, por tanto dicho ángulo va disminuyendo, la aceleración del borde superior va aumentando hasta un valor de 1,5 veces la aceleración de la gravedad. Se sigue de ello que el tablero con el vasito llegan a la mesa antes que la bola. Si, al inicio de la prueba, cada elemento que en ella interviene está situado en su lugar correcto, la bola caerá limpiamente dentro del vaso.

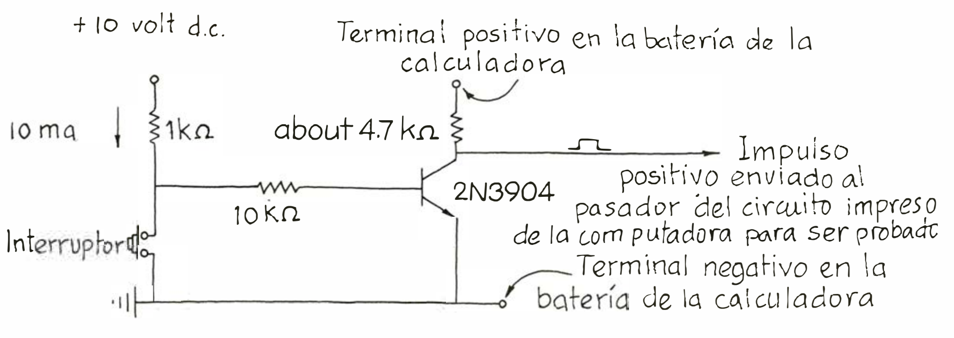
Recientemente, Albert A. Barlett, de la Universidad de Colorado en Boulder, ha descrito una modificación en el diseño del experimento anterior. Barlett fija un peso en el borde superior del tablero, justo por encima de la ranura o muesca donde situamos la bola. Se podría pensar que dicho peso adicional provocaría que el tablero descendiera aún más deprisa, pero lo que ocurre en realidad es exactamente lo contrario. La masa adicional del tablero disminuye su aceleración, debido a que el par no puede acelerar de igual manera al tablero y a la masa adicional como lo haría al tablero solo. Si basta con la masa adicional, el tablero no llega a la mesa antes que la bola y, en obvia consecuencia, la bola no caerá en el vaso. Incluso en determinadas circunstancias, la aceleración del tablero es tan pequeña que la bola permanece en contacto con él al principio de la caída y adquiere una velocidad horizontal antes de separarse finalmente. La bola pasa por encima del vaso, en lugar de aterrizar dentro de él.

Veamos ahora qué ocurre con el lá-



Terminales (pares)	Función	Terminales (pares)	Función
13 e y f	0	13 g y n	9
13 c y d	1	13 a	terminal negativo
13 c y e	2	13 p	terminal positivo
13 c y g	3	13 e y k	+/- (cambio de signo)
13 d y o	4	13 k y n	
13 e y o	5	13 c y i	+
13 g y o	6	13 i y o	-
13 m y n	7	13 g y h	punto decimal
13 e y n	8	13 h y i	=

Circuito y conexiones de los terminales de una calculadora modelo Concept V



Circuito para probar los terminales de una calculadora

piz. Como el lector sabe perfectamente, la punta del lápiz acaba por romperse si lo apretamos con fuerza. La punta se rompe debido a la tensión de flexión, de forma muy parecida a lo que ocurre cuando una chimenea se derrumba.

¿Se ha fijado alguna vez que todas las puntas de lápiz rotas tienen más o menos la misma longitud? Donald H. Cronquist, de San José, ha observado este hecho y ha diseñado un modelo sencillo para su explicación. Excluye los defectos de fabricación y el posible daño sufrido al sacarle punta como la causa primaria de la uniformidad en las rupturas. Los defectos de fabricación serían totalmente aleatorios en cada lápiz, y el posible daño causado al sacarle punta podría detectarse mirándola atentamente. Parecería más probable que la punta se quebrase por su lado posterior, en un lugar donde la flexión excediese la fuerza de tensión de la mina. La fuerza de tensión es una medida de la tensión máxima (fuerza por unidad de área) que puede soportar un determinado material sin doblarse mientras la tensión trata de estirarlo. El material se fractura cuando la tensión supera este valor máximo. (Por otra parte, si el material se comprime, cuando la tensión llega a sobrepasar la fuerza de compresión de dicho material, éste colapsa.)

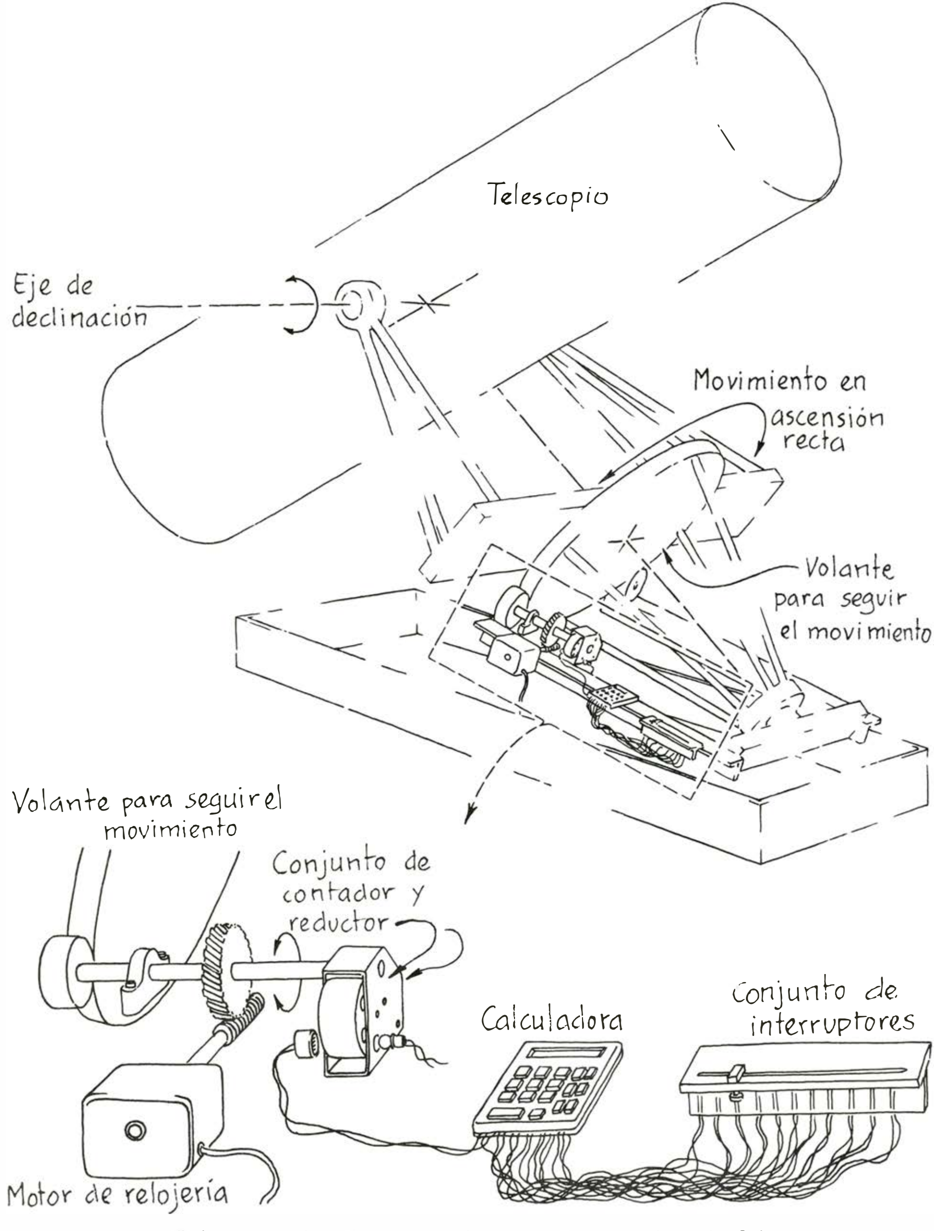
Al escribir con un lápiz, las fuerzas que ejercen el papel y la mesa sobre su extremo crean una tensión en la punta. En particular, aparece una fuerza neta perpendicular al eje del lápiz que trata de doblar la punta, comprimiendo el lado superior y alargando el lado inferior. Las tensiones aparecen a través de una sección transversal de la punta. En un material frágil, como una mina de lápiz la tensión máxima de alargamiento (la fuerza de tensión) suele ser menor que la tensión máxima de compresión (la fuerza de compresión). Por tanto, cuando se alcance una tensión límite, es más probable que se esté en el lado inferior de la punta.

Al sacar mina a un lápiz, no suele conseguirse una punta perfectamente afilada y cónica. Se pierde cierta longitud. Cronquist generalizó sus cálculos midiendo la distancia desde el punto de escritura hacia arriba, en función de la longitud perdida. Tales cálculos indican que la flexión alcanza un máximo en un lugar situado a una distancia del punto de escritura igual a la mitad de la longitud perdida. Debido a que el sacaminas afila la punta dándole forma cónica, se deduce que la flexión alcanza un máximo cuando el diámetro transversal mide 1,5 veces el diámetro del extremo de escritura (una razón de 3 a 2). Este es el punto de ruptura más probable para un lápiz idealizado.

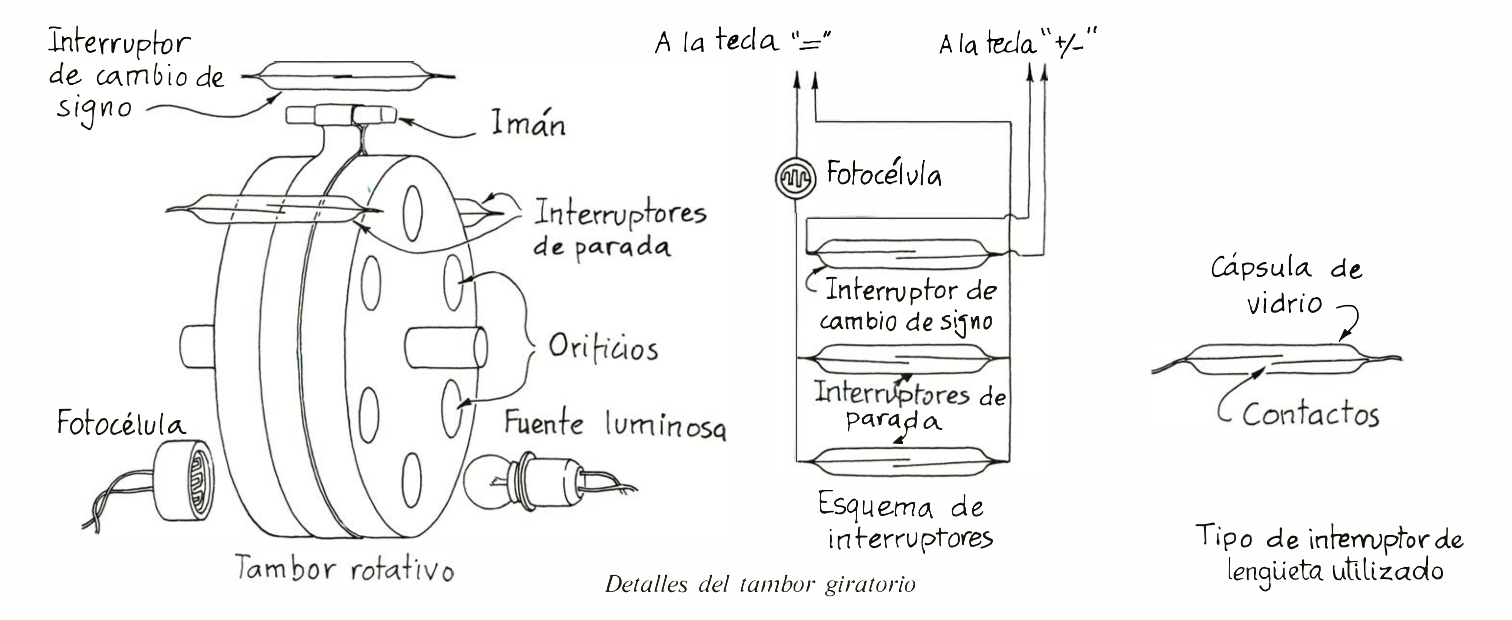
Para un extremo menos afilado, el punto de ruptura es mayor; y ello porque, con un extremo de escritura de diámetro superior, la flexión máxima se encuentra más arriba en el cono formado por la punta. Sin embargo, como la punta se rompe característicamente al poco de haber afilado el lápiz, las puntas rotas serán, por lo general, cortas y de longitudes más o menos iguales. La fuerza y la tensión reales requeridas para quebrarla variarán de un lápiz a otro, según la dureza de la mina y el ángulo del cono de la punta, pero la flexión máxima todavía debería darse en el lugar teórico determinado por la relación de 3 a 2 entre los diámetros.

El análisis no se extiende a los lápices romos. En uno de éstos, el punto de ruptura estaría teóricamente en el interior de la envoltura de madera. Además, puede no darse la relación de 3 a 2 entre los diámetros, que indica el punto más probable de ruptura. El análisis no tiene en cuenta las variaciones debidas a la fabricación y afilado; no considera tampoco la variedad de fuerzas que actúan en el lápiz durante el uso. Por último, el análisis ignora la fuerza neta paralela al eje del lápiz, concentrándose, por contra, en la fuerza neta perpendicular al eje. No obstante, la fórmula sí predice con buena aproximación las medidas de las minas rotas.

He comprobado el análisis afilando y rompiendo sistemáticamente las puntas de varios lapiceros. Los diámetros y longitudes de las puntas rotas (medidas desde el punto de escritura al lugar donde empezó a quebrarse) fueron medidos con un micrómetro. Al principio, no intenté normalizar la rotura. Los resultados no fueron concluyentes porque



Colocación de una calculadora según el modelo de John y Dave Guerra para registrar el movimiento lateral de un telescopio



Detalles del tambor giratorio

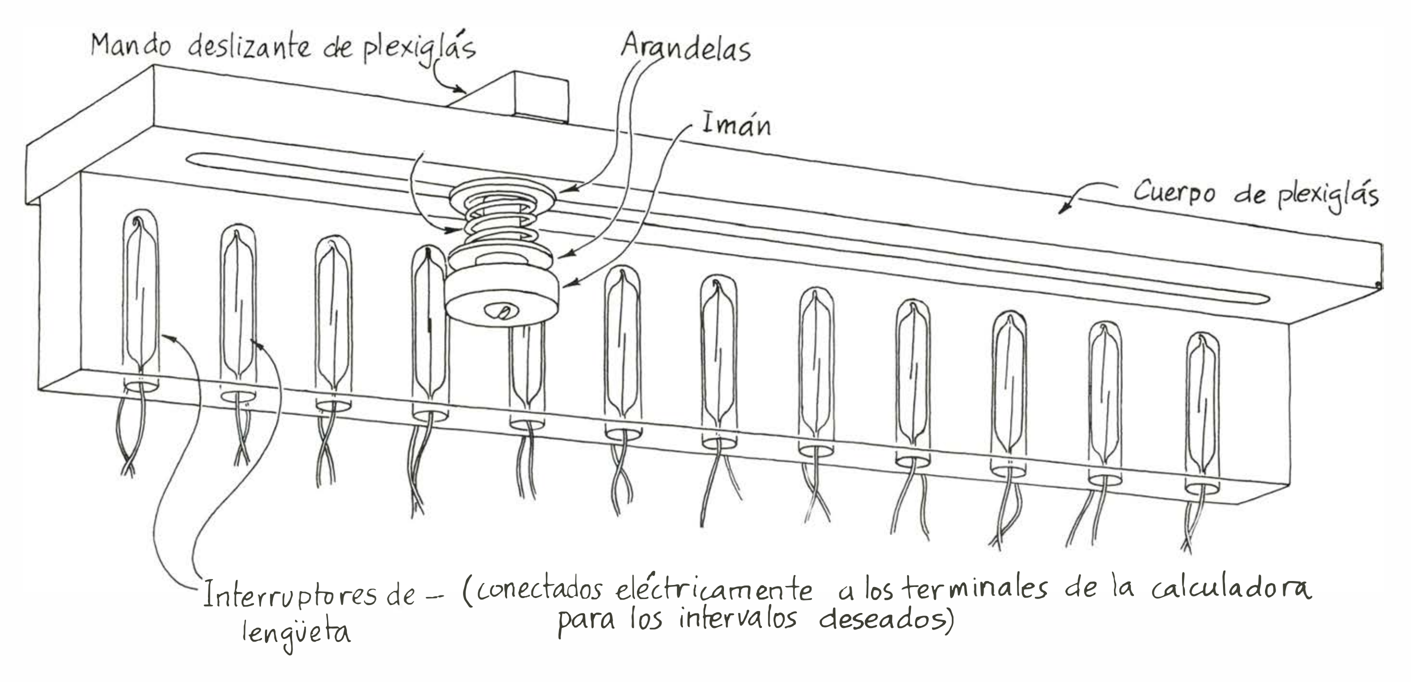
las longitudes de las puntas rotas variaban considerablemente, aun cuando los diámetros de la punta eran los mismos.

Me esforcé luego por hacer la rotura más consistente. Al sacar punta, giraba el lápiz al tiempo que hacía lo propio con el sacaminas con el fin de obtener un pulimento uniforme alrededor de la punta del lapicero. Sujeté luego el lápiz de la siguiente manera: la punta estaba en un determinado lugar de la mesa y mi mano se mantenía justo encima de un amortiguador de goma que usaba como referencia de altura. Mantuve así el ángulo del lápiz con el mantel aproximadamente igual (unos 45 grados), durante todo el tiempo. Con el lápiz colocado en esta posición, apretaba hacia abajo hasta que la punta saltaba (hay que tener cuidado de que la mina no nos salte a un ojo). Si la rotura se producía arriba en el revestimiento de madera, desechaba el dato.

Las puntas se rompían casi siempre de la misma forma, empezando por la parte inferior de la mina, y propagándose hacia arriba y hacia fuera del punto de escritura, hasta alcanzar la parte apical. Ni Cronquist ni tampoco yo sabemos exactamente por qué se propaga la rotura de esta manera, aunque el modelo es similar al de las chimeneas que se caen.

Representé las medidas de las minas rotas en función de los diámetros de los puntos de escritura. Para trazar una línea recta a través de los puntos de los datos, usé una calculadora de bolsillo, capacitada para regresiones lineales. Teniendo ambos ejes en el gráfico la misma escala, la pendiente de la línea era de 2,5. Con mi sacapuntas, que afila los lápices hasta conseguir un ángulo de punta de unos 12 grados, la inclinación de la línea debería ser, según la teoría de Cronquist, de 2,2. Teniendo en cuenta las diferencias de fabricación de los lápices, los resultados experimentales resultaron sorprendentemente similares a los teóricos.

Se puede seguir recogiendo datos acerca de las medidas de las puntas rotas, investigando con lápices de diferente dureza y diámetro. ¿Acierta la teoría de Cronquist cuando afirma que no hay ningún factor que influya especialmente en las longitudes de las puntas rotas? Se puede ver también como varía la longitud a medida que lo hace el ángulo entre el lápiz y la mesa. Para cual-



Montaje del interruptor deslizante

quiera de estas variaciones, es necesario recoger muchos datos, representarlos y determinar luego el mejor ajuste de una línea recta a través de ellos. Cabe esperar que la teoría no funcione tan bien cuando la punta del lápiz está muy afilada o muy poco, y que los datos se reflejen mejor con una línea curva.

Los mecanismos para indicar la posición de un telescopio son a veces complejos y difíciles de leer en la obscuridad. John y Dave Guerra, de Ludlow, Massachusetts, han diseñado un indicador de posición que utiliza el circuito integrado de una calculadora de bolsillo. El aparato es barato, muy preciso y fácil de leer en la obscuridad.

No sirve cualquier calculadora. Se puede encontrar una apropiada de la siguiente forma: después de ponerla en funcionamiento, se apretará la tecla "más"; luego la tecla "1". Se pulsará entonces la tecla "igual" (=) varias veces. La calculadora deberá añadir 1 a una suma sucesiva, cada vez que se pulsa la tecla de igual. Se pulsará entonces, una vez, la tecla "más-menos" (esta tecla es la que hace que la calculadora cambie de signo) y varias veces la de "igual". La calculadora deberá restar, ahora, 1 de la cifra cada vez que se pulse la tecla de "igual". Si la calculadora opera de acuerdo con este programa, sirve para el diseño de Guerra.

Los Guerra se propusieron acoplar el eje giratorio del telescopio a la pantalla digital de la calculadora, de manera que ésta diera la orientación del telescopio. El acoplamiento se realiza a través de varios pasos. El telescopio de los Guerra tiene un eje polar con una relación de engranajes de 10:1. Para conseguir una capacidad de rotación neta de 1200 veces la rotación del telescopio, adaptaron un mecanismo de relojería de reducción con una relación de 120: 1. En el cilindro final del mecanismo de relojería hicieron seis agujeros, dispuestos de suerte que giraran a través de un rayo de luz dirigido a una fotocélula. Cada vez que el último cilindro del mecanismo daba una vuelta, el rayo incidía en la fotocélula seis veces. Una rotación polar completa del telescopio producía, por tanto, 7200 pulsaciones de luz (6 x 1200). Se conectó la fotocélula a la tecla "igual" de la calculadora; y así cada pulsación luminosa accionaba este botón y añadía otro uno (o cualquier otra cantidad que se deseara) a la cifra ya existente. Los Guerra construyeron dos aparatos de éstos, uno para el eje de ascensión recta del telescopio y otro para el eje de declinación.

Para usar estos aparatos, los Guerra orientan primero el telescopio hacia una estrella de posición conocida, introduciendo en la calculadora las coordenadas de la estrella, obtenidas de un atlas de estrellas. Giran luego el telescopio sobre su eje hacia otra estrella, cuya posición quieren determinar. La rotación dispara las fotocélulas, que, a su vez, ponen en marcha la calculadora. Se pueden leer entonces las nuevas coordenadas en las respectivas pantallas.

Podemos determinar de antemano el intervalo de la calculadora (es decir, cuánto avanza ésta con cada impulso de luz en la fotocélula). Supongamos que queremos que sea 0,2. Cada impulso incrementará entonces la lectura en 0,2. Una rotación completa del telescopio, que corresponde a 24 horas, o 1440 minutos, mostraría una lectura de 1440. En otras palabras, la lectura está en minutos de tiempo, lo cual sería útil para la ascensión recta. Si se prefiere minutos de arco (adecuados para la declinación) se debería fijar una cantidad de 3.

Los Guerra usaron una calculadora Concept V en su experimento. El lector puede encontrar otras marcas que le vengan mejor. Si se recurre a otra calculadora, hay que repetir el procedimiento de los Guerra para determinar cómo están acoplados los terminales (pins) del circuito con las teclas de la calculadora. Con el modelo Concept V, los Guerra pudieron determinar, por medio de inspección visual, cómo se conectaban los interruptores situados detrás de cada tecla con los cables de la placa del circuito integrado y cómo se conectaban, a su vez, los cables a los terminales situados detrás del tablero.

Pero, la inspección visual puede resultar demasiado difícil con algunas calculadoras. En cuyo caso habría que probar los terminales con un aparato que consiste en un transistor *n-p-n*, nada caro, algunas resistencias y un interruptor. Hay que elegir la resistencia de acuerdo con el interruptor, de manera que circulen a través de la resistencia unos 10 miliampère cuando se cierre el interruptor. Por ejemplo, si se ponen 10 volt a través del interruptor (como en la ilustración inferior de la página 111) la resistencia deberá ser de 1000 ohm. Al apretar el interruptor, llega una señal al transistor, produciendo una señal lógica positiva que será alimentada desde la batería del calculador al terminal bajo investigación. Con una calculadora que responda a señales lógicas negativas, hay que intercambiar las posiciones del interruptor y su resistencia. Algunas calculadoras funcionan de otra forma; no tienen masa común en un terminal, sino que están diseñadas de suerte que, al apretar una tecla, cortocircuitan dos terminales para que lleven a cabo el proceso deseado. Pero en todos los modelos de calculadora hay que realizar las pruebas con mucho cuidado a fin de evitar que el aparato se estropee.

Si giramos el telescopio en dirección opuesta a lo que se considera el sentido positivo, la calculadora debe recibir la instrucción de restar cada impulso que reciba de la fotocélula. Los Guerra diseñaron un mecanismo simple que accionaba la tecla "más-menos" de modo que se realizara la operación adecuada. Una banda fina de metal (que actúa como un embrague de fricción) alrededor del cilindro giratorio porta un imán pequeño. Alrededor del imán hay tres interruptores de lengüeta. Al girar el telescopio en sentido positivo, el imán se apoya en uno de los interruptores de lengüeta; de ello resulta que, a cada impulso de luz, la calculadora suma. Cuando el telescopio cambia de dirección, la fricción determina que la banda de metal gire con el cilindro; y, por tanto, el imán se sitúa más allá del interruptor central y descansa sobre el tercero de ellos. Cuando el imán atraviesa el interruptor central, el campo magnético cierra transitoriamente el interruptor al forzar la unión de las dos lengüetas. Durante ese breve cierre, el interruptor envía un impulso a la calculadora para cambiar los signos. Cuando el imán vuelve a reposar, esta vez sobre el tercer interruptor, los impulsos de luz activan de nuevo la fotocélula y la tecla "igual", pero ahora la calculadora sustrae el intervalo preestablecido de la cantidad precedente. Los dos interruptores exteriores se hallan en paralelo entre sí, y ambos en serie con la fotocélula, para evitar el registro de impulsos erróneos durante el cambio de dirección.

Los Guerra construyeron también un mecanismo de arranque que se ocupaba de las operaciones iniciales de activación de la tecla "más" y de fijación de los intervalos deseados. Consistía en una barra deslizante de plexiglás unida a un resorte tenso y montado con un pequeño imán. Debajo del imán se sitúa otra capa de plexiglás que contiene varios interruptores de lengüeta. Cada interruptor está fijado a las teclas de la calculadora, que deberían normalmente apretarse para habilitar la calculadora para su uso específico. A la hora de preparar la calculadora, se deslizará la barra sobre los interruptores. El último interruptor, que actúa como parada para el imán, activa las células luminosas y una bombilla intermitente de 3 volt que proyecta su luz sobre la fotocélula. Si el operador deseara usar la calculadora para sus fines de cómputo, no tiene más que retirar el imán de este último interruptor de lengüeta.

Libros

Ecociencia para ecologistas, sistemas analógicos y digitales y una valiosa herramienta de laboratorio

Ramón Margalef, Enrique Gadea y Pedro Pastor Lozano

ECOSCIENCE, POPULATION, RESOURCES, ENVIRONMENT, por Paul R. Ehrlich, Anne H. Ehrlich, y John P. Holdren, W. H. Freeman & Co., San Francisco, 1051 págs. (1977). Es la tercera edición de una obra que apareció por primera vez en 1970 y que ha tenido considerable éxito. Sus autores pertenecen a las universidades de Stanford y California (Berkeley) y son científicos que han trabajado en áreas diversas de la ecología. Pero titulan a este libro *Ecociencia,* y tratan en él de una ecología centrada más en los problemas humanos que en el hombre como especie biológica, y con el punto de militancia que lleva consigo el ecologismo. En español tenemos los dos derivados de ecología, ecólogo y ecologista, el segundo con una mayor connotación de activismo. La *Ecociencia* es un texto muy apropiado para los ecologistas, donde encontrarán una gran cantidad de información, puesta al día y comprobada, que no deja ningún cabo suelto de los temas más usados por los alarmistas, aunque los presentan con ponderación, sin dejar de interesarse por la búsqueda e identificación de los culpables. La información es abundantísima, tanto en el texto, como en notas y tablas y en frecuentes recuadros o secciones del texto impresos con tipo diferente que se ocupan, generalment muy bien, de algunos temas selectos y un tanto secundarios a la ilación del texto principal. Muchas partes tienen casi demasiada información; escritas con estilo periodístico, resulta difícil para el lector hacerse su propio resumen o visión sinóptica. Tengo la impresión que hay pocos errores, y el texto peca más por omisión que por comisión. El detalle a veces resulta ilusorio porque es selectivo y deja fuera grandes áreas. Por ejemplo, España raramente aparece en las tablas y comparaciones, pero aparecen frecuentemente otros países con estadísticas aun más dudosas. Seguramente es el mejor libro de este tipo y si la crítica del lector templa el celo de los autores, se puede sacar mucho provecho de él, como mina de información. Lo recomendaría como una excelente enciclopedia de consulta para periódicos, asociaciones, etc., interesados en ecologismo.

El texto está dividido en 16 capítulos repartidos en cinco secciones. La sección primera (176 páginas) es una excelente introducción a la ecología, con la descripción del medio físico (la figura 2.5 muestra un concepto de termoclina que muchos ecólogos no compartirían), ciclos, poblaciones, comunidades y coevolución. Se introduce con especial dramatismo el tema de la población y de su aumento, que será un hilo conductor en todo el libro.

La sección segunda trata de la población y de los recursos renovables (200 págs.). Examina la producción de alimentos, el estado de nutrición en los distintos países, señalando que el estado de subdesarrollo deriva en parte de una alimentación pobre. Tratan también de las enfermedades y de la triste historia de mala administración y corrupción, con las dificultades que representa ayudar realmente al desarrollo de la agricultura en países subdesarrollados. La importancia del subsidio de energía externa para la producción agrícola destaca en una figura muy atractiva (7.22). De los datos se deduce que muchas prácticas del desarrollo son beneficiosas, pues, por ejemplo, limitan muchas pérdidas secundarias de las cosechas y, por otra parte, los países desarrollados tienen una exportación neta de alimentos. Es muy natural que cualquier proyección conduzca a prever que la demanda va a exceder de la oferta. Este ha sido siempre un factor de evolución.

La tercera sección, de 150 páginas, trata de energía y materiales y es particularmente rica en información concreta. Trata con detalle de las técnicas de obtención de energía nuclear y de otras formas de energía (sol, viento, etc.) y, en relación con los diversos materiales empleados por la civilización, estudia el uso, las reservas, el reciclado, posible sustitución y las pérdidas inevitables o dispersión.

Entender las perturbaciones ambientales es el tema de la sección cuarta (180 páginas). Se inicia con el estudio de la contaminación del aire y del agua por pesticidas, metales, etc., aunque a veces se echa de menos la comparación con las condiciones supuestamente normales, aunque esto no es imputable a los autores, ya que hoy día muchos análisis de metales en el ambiente se orientan a detectar una contaminación sin haber reconocido las condiciones usuales de concentración y ciclo. Las secciones sobre mutagénesis y peligros de la radiación son muy informativas. La sección sobre el cáncer es algo efectista, por ejemplo, la correlación positiva entre frecuencia de cáncer y consumo de carne puede indicar simplemente que el cáncer es indicador de longevidad de las poblaciones, como la presencia de coli lo es de materias fecales. Si la mayor parte de los casos de cáncer son de origen "ambiental", también lo es la mayor proporción de las muertes; esto no quiere decir nada, pero hay palabras que hoy día estimulan más que otras la emoción. Los efectos sobre la naturaleza incluyen las consecuencias del uso de plaguicidas y sus fracasos, el inevitable "ecocidio" de Vietnam, la eutrofización, las alteraciones de la atmósfera (ozono, etc.), pero algo menos los mecanismos de regulación del ozono y del anhídrido carbónico atmosférico, que realmente son una bendición frente a la ligereza humana. Personalmente hubiera deseado una visión más sintética del efecto del hombre sobre la naturaleza, basada en las consecuencias de explotación, transporte y uso de energía externa, factores todos ellos contrapuestos a los procesos naturales de sucesión u organización.

La sexta y última sección trata, en 250 páginas, de la condición humana en busca de salidas. Desarrolla los tópicos usuales, señala lo falaz que es la pretensión de que todo el mundo pueda tener la densidad de población y el bienestar de Holanda o Dinamarca. Los autores centran el problema, correctamente, en el aumento de población y la necesidad de planificarla, con un extenso debate sobre actitudes, técnicas y posibles maneras de aplicarlas. También tratan extensamente de otros problemas y actitudes, con la crítica del consumismo y mención de los diversos tipos de conflicto internacional (sorprende un poco, en un mapa de sistemas políticos de Sudamérica, ver a Paraguay y a Venezuela del mismo color). Esta sección es para mi la menos satisfactoria, porque vuelve endeble a toda la inspiración progresiva que aparentemente tiene el libro, ya que sigue la tradición anglosajona y no contempla la posibilidad de que cada mundo o cada parte del mundo desa-

rrolle su propia estrategia. Pretender imponer los dominantes a los menos desarrollados una particular estrategia es diálogo de sordos.

Su resumen se titula "Cornucopians versus Neo-malthusians" y acabá escribiendo: El problema real para todos los preocupados por soluciones realistas es si los intelectuales y los políticos de toda laya podrán encontrar a tiempo la manera de armonizar el comportamiento del hombre con la realidad física. No es un problema nuevo, pues a todos y a cada uno de nosotros se nos acaba el tiempo concedido antes de conseguirlo. Pero así funciona el mundo. Yo creo que hay algo fundamentalmente falso en una ecociencia que es capaz de conjurar un catálogo tan extenso de espadas de Damocles suspendidas encima de nuestras cabezas. *E pur si tiene!* nos sentimos tentados a decir, parodiando a Galileo. Quizá los mismos biólogos tienden a olvidar que la vida es apuesta continua y puro milagro.

El libro lleva varios apéndices con datos estadísticos sobre demografía, alimentos, pesticidas y control de nacimientos. En las guardas hay útiles tablas de unidades, de conversión y del significado del creciente número de acrónimos. El libro está impreso a doble columna, con tipos muy claros, tablas de factura excelente, figuras abundantes y técnicamente perfectas, con algunas fotografías no muy necesarias. La bibliografía está repartida por capítulos y es riquísima. Lleva índices de materias y autores, pero no de organismos, que en este libro, si no es el hombre parecen tener menor importancia. (R.M.).

PRACTICAS DE BIOLOGIA, por equipo de profesores de la Facultad de Biología de la Universidad de Barcelona. Editorial Fontalba, Barcelona, 1978, 264 pp. y 16 lám. Un libro de prácticas de biología es siempre esperado y bien recibido; pero, por su índole, es una obra difícil de conseguir a gusto de todos. La Biología, no siempre bien deslindada, en su sentido estricto, de las Ciencias Biológicas, puede concebirse, según el criterio de los diversos autores, con mayor o menor alcance y envergadura. Y ello, naturalmente, incide en el ámbito de su enseñanza, tanto teórica, como práctica. En la obra aquí comentada se aprecian estas circunstancias. Ello, unido al énfasis que se concede a determinados campos, acusa el hecho universal de que también la ciencia –como ya indicó Cajal en algunas de sus obras– no escapa, tanto en su cultivo, como en su docencia, al influjo de las modas al uso.

Dejando estas consideraciones previas aparte, tiene este libro el extraordinario valor de ser una obra vivida, que tuvo su embrión en un "Cuaderno de Prácticas" realizado en equipo o colaboración por un grupo de entusiastas profesores de la Facultad de Biología de la Universidad de Barcelona, en la que cada autor se ocupa de los temas de su especialidad, resultando en este aspecto una guía didáctica de gran competencia. Han intervenido en esta obra J. Cuello, M. Hernández, J. Josa, J. Masségú, S. Sarquella, M. Ballesteros, M. Blas, J. Estany, F. Pereira y X. Martínez Farré; y en la parte gráfica, Coup, Oller y Sáiz.

Como muy bien pone de manifiesto el Prof. J. Planas Mestres en el sincero y preciso prólogo del libro, sólo por lo expuesto sería ya una obra encomiable; pero es que, además, lo es también por su contenido, su orientación y su presentación, aparte de su valor formativo y didáctico, y también por algunas de sus novedades e incluso singularidades. Está destinada, como indican sus autores, a los estudiantes y concebida para ser utilizada como manual del alumno en el primer año de la licenciatura, aunque también es aplicable, en buena medida, a los cursos de orientación universitaria. En ningún caso, sin embargo –como también hacen notar sus autores–, puede sustituir al profesor, para quien también se incluye la pertinente información: se trata, en todo caso, de un medio auxiliar o complementario.

La metodología es tal vez el aspecto más revolucionario o novedoso; pero en todo momento se trata de conseguir que el alumno experimente en la práctica los conceptos básicos de la biología, con el propósito, en parte, de que tal experimentación ya no sea necesario enseñarla en los cursos superiores de la licenciatura. Los ejercicios prácticos están agrupados en temas que corresponden a las distintas unidades teóricas de un programa de biología general. Al final de cada tema se incluye una lista del material necesario para la realización práctica del mismo, así como una bibliografía en la cual se citan aquellas obras que ofrecen una ampliación del mismo, y en ciertos casos incluso algún manual donde ampliar las cuestiones teóricas.

Los temas tratados son veintidós en total y comprenden: observación y estudio del comportamiento; microscopio compuesto y lupa binocular; reconocimiento y valoración de los principios inmediatos, con un estudio de la fermentación alcohólica; técnica microscópica e histología vegetal; anatomía y morfología animal de invertebrados y vertebrados; tejidos animales; extensión de sangre; observación de microorganismos, con inclusión de la tinción de Gram y antibiogramas; mitosis y meiosis; reproducción (fecundación, desarrollo embrionario y ciclos sexuales); pigmentos vegetales y fotosíntesis; problemas y juegos de genética; estudios de genética en *Drosophila;* variabilidad en la especie humana; estudio estadístico de una población biológica; hominización; orientaciones generales para el trabajo de campo (cartografía y recolección de muestras); y estudio de la contaminación del agua. Todo ello seguido de un apéndice de accidentes de laboratorio y su tratamiento, y de otro sobre manejo y utilización de la información escrita, finalizando con una notable, aunque prudente, lista bibliográfica, agrupada por campos.

La parte gráfica comprende esquemas y dibujos intercalados en el texto, muy claros y didácticos, y dieciséis láminas de fotograbados en color y en negro, que incluyen microfotografías a nivel óptico y electrónico junto con diseños anatómicos a nivel macroscópico.

Por todo cuanto se ha expuesto, se trata de un libro de positivo valor. No obstante, puestos a hacer también la parte del abogado del diablo, cabría decir que la obra adolece de algunos extremos. En primer lugar se evidencia una cierta desproporción tanto en los distintos aspectos del temario, como en la participación de los distintos autores. Así, la parte dedicada a los ámbitos genético, poblacional y antropológico resulta un tanto sobrecargada, en detrimento de otros aspectos que resultan a veces tal vez insuficientes. Continuando en este sentido crítico, podría añadirse que, en su conjunto, carece de cierta coherencia, que se trasluce en determinada discontinuidad de su contenido temático.

Aparte de estas pequeñas consideraciones, constituye una obra muy recomendable para los niveles de primer curso de licenciatura y otros similares (veterinaria, por ejemplo), por su concepción y por su gran valor didáctico y formativo. En este sentido hay que felicitar a los autores del equipo realizador y agradecerles una obra de las que tan necesitado se encuentra nuestro país. (E.G.).

SISTEMAS DIGITALES Y ANALOGICOS, TRANSFORMADAS DE FOURIER, ESTIMACION ESPECTRAL, por Athanasios Papoulis con la colaboración de M. Berpoulis con la colaboración de M. Bertrán, Marcombo Boixareu Editores; Barcelona, 1978; 308 páginas. Esta publicación aparece con un año de diferencia de la obra "Signal Analisis" (1977) del mismo autor y como consecuencia de un Seminario impartido en Barcelona, gracias al patrocinio de la E.T.S. de Ingenieros de Telecomunicación y la Cáte-

dra de Automática de la E.T.S. de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Barcelona. Aunque no es una traducción de aquélla, sigue las líneas básicas propias de la primera obra, pero con menor extensión en el desarrollo del contenido.

El libro, que versa sobre el proceso y análisis de señales, es el primero aparecido en castellano que trata paralelamente el estudio de señales, sistemas discretos y continuos. Su autor tiene un gran prestigio internacional, con numerosas publicaciones en este campo. Obra eminentemente básica sobre los fundamentos de la teoría de sistemas lineales y estimación espectral, viene completada por una buena colección de problemas resueltos y una abundante bibliografía. Aunque el título de la obra se refiere genéricamente a sistemas digitales y analógicos, realmente el contenido trata de sistemas discretos y continuos y, por supuesto, sobre señales discretas y continuas como funciones de una variable independiente que normalmente es el tiempo, sin considerar ningún tipo de cuantificación.

El proceso de señales ha venido estudiándose en diversas áreas de la ciencia, pero en telecomunicación desde sus inicios ha formado parte del análisis de las perturbaciones que afectan a una comunicación, tanto al canal como al receptor en forma de distorsión, ruido, etcétera. Históricamente, la simulación y aproximación mediante modelos matemáticos que interpretaban el fenómeno físico siempre se centraron sobre sistemas analógicos, que fueron los que primeramente se utilizaron; sin embargo, el desarrollo de la tecnología propició la aparición de los primeros sistemas y ordenadores digitales facilitando la conversión analógica digital y el aprovechamiento de la enorme posibilidad de trabajar en tiempo real; ello incrementó la investigación de algoritmos matemáticos que simplificaron el tratamiento y proceso digital de señales. La aplicación de estos medios matemáticos para reducir el tiempo de computación, tanto en la simulación de sistemas como en el desarrollo de los mismos, abre perspectivas inéditas para el proceso digital, siendo donde se encaminan casi todos los esfuerzos del análisis de señales.

El planteamiento del libro en dos partes parece acertado. La primera, relativa a sistemas discretos y continuos, es autoexplicativa, pero es necesario un conocimiento matemático básico para su seguimiento; por ello el autor incluye el análisis de la transformada de Fourier con objeto de completar el estudio del proceso digital de señales analógicas con que se cierra dicha parte. Consta de cinco capítulos donde en el primero, esencialmente definitorio, se establecen las secuencias y funciones (delta, escalón, etc.) empleadas en el análisis de las propiedades de los sistemas discretos y continuos mediante las transformadas Z y de Fourier. Finaliza esta introducción con las bases de la simulación digital de sistemas analógicos.

En el capítulo segundo, "Sistemas Discretos", se enumeran las principales propiedades de la transformada Z generalizando los teoremas esenciales del capítulo anterior. En concreto, la transformada inversa Z se obtiene como desarrollo en serie de potencias y fracciones simples sin recurrir a una integral curvilínea (teorema de la integral de Cauchy). En la parte principal del capítulo se define un sistema discreto de la ecuación de recurrencia de orden finito (transformada Z de una ecuación diferencial de coeficientes constantes) y se estudia la función de transferencia del sistema discreto como un filtro digital, presentándose algunas transformaciones para el análisis y síntesis del mismo.

El capítulo tercero, "Análisis de Fourier", es un recordatorio de las transformadas y series de Fourier, cuya aplicación permite trabajar con señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia. La evaluación numérica y resolución de la integral de Fourier mediante el sumatorio de Poisson conduce a las series de Fourier. La utilización de las series de Fourier como una secuencia finita de valores para interpolar la transformada de Fourier de una señal continua es la serie discreta de Fourier (S.D.F.). Finalmente, el autor presenta el algoritmo más utilizado en la computación de los coeficientes de la serie discreta de Fourier, la transformada rápida de Fourier: "Fast Fourier Transform" (F.F.T.). Este capítulo incluye varios apéndices cuya materia se utiliza en todo el texto.

En el capítulo cuarto, "Sistemas Continuos", se completan las propiedades de los sistemas lineales con señales continuas presentadas en el capítulo primero y algunos métodos de análisis del espectro de señal. La introducción de la transformada de Hilbert sirve para el estudio de filtros y modulaciones. En la última parte del capítulo se establece un paralelismo con los sistemas discretos en cuanto a la función de transferencia de los sistemas continuos de orden finito, mediante la transformada de Laplace. Se incluye un apéndice sobre la respuesta máxima de sistemas lineales.

El capítulo cinco "Procesado digital de señales analógicas" abarca toda la teoría matemática para la simulación de sistemas analógicos considerando como hipótesis que cualquier señal continua puede ser representada por un conjunto discreto de puntos, aplicando el teorema de muestreo. El problema de la interpolación y minimización del error cuadrático medio cometido en la aproximación de un sistema analógico por medio de un sistema discreto de orden finito, es analizado por el autor bajo la óptica de la optimización. Particulariza para el caso de que la función de transferencia del sistema discreto sea un filtro no recurrente —"Finite impulse response" (F.I.R.)—, es decir, un polinomio trigonométrico, y la interpolación en el dominio de la frecuencia sean series discretas de Fourier. En la última parte se analiza el muestreo en el tiempo y algunas transformaciones para resolver simulaciones de filtros de orden finito.

La segunda parte, que consta de tres capítulos, presenta el estudio de señales aleatorias y está más sintetizada y condensada que la primera, y como el propio autor indica, menos elaborada. El capítulo seis, "Procesos estocásticos", ofrece muy resumidamente varias definiciones de la teoría de procesos estocásticos. Como en la primera parte, se estudia la respuesta de un sistema lineal con entradas estacionarias y no estacionarias. El problema de la estimación de una señal con ruido y la reducción del error cuadrático medio (alisado de datos) es la parte final del capítulo.

En el capítulo siete, "Ergodicidad, estimadores de la correlación, integrales de Fourier", se determina la relación entre el promedio temporal y el promedio conjunto de un proceso ergódico. Los estimadores de correlación de un proceso estocástico se analizan como muestras finitas del mismo. En la segunda parte del capítulo, basándose en una serie de propiedades de las transformadas de Fourier de procesos estocásticos, se analizan señales determinísticas contaminadas de ruido aleatorio; la reducción del ruido se logra por truncamiento y empleo de conformadores (ventanas). Finalmente se enumeran una serie típica de ventanas. En el último capítulo, "Estimación espectral", se estudia el espectro de potencia de un proceso estocástico, mediante una muestra en un intervalo finito empleando los procedimientos del capítulo anterior, y cómo se debe alisar convenientemente para que la estimación sea fiable; esto implica la elección de una ventana óptica que minimice la estimación. La estimación del espectro de potencia es el concepto de la técnica que mayor difusión tiene.

Finalmente, a modo de resumen, cabe indicar que el libro está bien concebido estructuralmente y pensamos que logra su objetivo de introducción a los fundamentos de la teoría de sistemas (P.P.L.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

LA VERIFICACION DE LOS ACUERDOS SALT II

RECONNAISSANCE AND ARMS CONTROL. Ted Greenwood en *Scientific American*, vol. 228, n.º 2, págs. 14-25; febrero, 1973.

THE VERIFICATION OF ARMS CONTROL AGREEMENTS. George W. Rathjens en *Arms Control Today*, vol. 7, n.º 7/8, págs. 1-4; julio-agosto, 1977.

SALT II AND AMERICAN SECURITY. Jan M. Lodal en *Foreign Affairs*, vol. 57, n.º 2, págs. 245-268; invierno, 1978-79.

COMO RESPIRAN LOS HUEVOS DE LAS AVES

DIFFUSION OF GASES ACROSS THE SHELL OF THE HEN'S EGG. O. Douglas Wangensteen, Donald Wilson y Hermann Rahn en *Respiration Physiology*, vol. 11, págs. 16-30; 1970-71.

RESPIRATORY GAS EXCHANGE BY THE AVIAN EMBRYO. O. Douglas Wangensteen y Hermann Rahn en *Respiration Physiology*, vol. 11, págs. 31-45; 1970-71.

RESPIRATORY PROPERTIES OF CHICKEN EMBRYONIC BLOOD DURING DEVELOPMENT. Hiroshi Tazawa, Tomohisa Mikami y Chiyoshi Yoshimoto en *Respiration Physiology*, vol. 13, págs. 160-170; 1971.

THE AVIAN EGG: AIR-CELL GAS TENSION, METABOLISM AND INCUBATION TIME. H. Rahn, C. V. Paganelli y A. Ar en *Respiration Physiology*, vol. 22, págs. 297-309; 1974.

THE AVIAN EGG: INCUBATION TIME AND WATER LOSS. H. Rahn y A. Ar en *The Condor*, vol. 76, n.º 2, págs. 147-152; 1974.

ESTRUCTURAS ATOMICAS DE SUPERFICIES CRISTALINAS

LOW ENERGY ELECTRON DIFFRACTION. J. B. Pendry. Academic Press, Londres y Nueva York, 1974.

ELECTRON DIFFRACTION: FIFTY YEARS AGO. Richard Gehrenbeck, en *Physics Today*, n.º 1, pág. 34; enero, 1978.

LOW ENERGY ELECTRON DIFFRACTION. M. A. Van Hove y S. Y. Tong, Springer, 1979.

ARQUEOLOGIA EN EL FONDO DE LOS LAGOS

LES FOUILLES PRÉHISTORIQUES: TECHNIQUES ET MÉTHODES. André Leroi-Gourhan. A. y J. Picard et cie., 1950.

L'ETAT DE LA DENDROCHRONOLOGIE EN EUROPE OCCIDENTALE ET LES RAPPORTS ENTRE DENDROCHRONOLOGIE ET ARCHÉOLOGIE EN SUISSE. Georges Lambert y Christian Orcel en *Archives suisses d'anthropologie générale*, tomo 41, fasc. 2, págs 73-97; 1977.

SILVICULTURA

THE PRACTICE OF SILVICULTURE. David M. Smith. John Wiley & Sons, Inc., 1962.

FOREST ECOLOGY. Stephen H. Spurr y Burton V. Barnes, John Wiley & Sons, Inc., 1973.

TIMBER: BIOLOGICAL AND ECONOMIC POTENTIAL. Stephen H. Spurr y Henry J. Vaux en *Science*, vol. 191, n.º 4227, págs. 752-756; 20 de febrero de 1976.

SOLITONES

PSEUDOPARTICLE SOLUTIONS OF THE YANG-MILLS EQUATIONS. A. A. Belavin. A. M. Polyakov, A. S. Schwartz y Yu. S. Tyupkin en *Physics Letters*, vol. 59B, n.º 1, págs. 85-87; 13 de octubre de 1975.

FERMION-BOSON PUZZLE IN A GAUGE THEORY. P. Hasenfratz y G. 't Hooft en *Physical Review Letters*, vol. 36, n.º 19, págs. 1119-1122; 10 de mayo de 1976.

SPIN FROM ISOSPIN IN A GAUGE THEORY. R. Jackiw y C. Rebbi en *Physical Review Letters*, vol. 36, n.º 19, págs. 1116-1119; 10 de mayo de 1976.

SOLITONS WITH FERMION NUMBER 1/2. R. Jackiw y C. Rebbi en *Physical Review D*, vol. 13, n.º 12, págs. 3398-3409; 15 de junio de 1976.

SYMMETRY BREAKING THROUGH BELL-JACKIW ANOMALIES. G. 't Hooft en *Physical Review Letters*, vol. 37, n.º 1, págs. 8-11; 5 de julio de 1976.

VACUUM PERIODICITY IN A YANG-MILLS QUANTUM THEORY. R. Jackiw y C. Rebbi en *Physical Review Letters*, vol. 37, n.º 3, págs. 172-175; 19 de julio de 1976.

QUANTUM MEANING OF CLASSICAL FIELD THEORY. R. Jackiw en *Reviews of Modern Physics*, vol. 49, n.º 3, págs. 681-706; julio, 1977.

ORIGEN DEL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

THEORIES OF THE GEOMAGNETIC AND SOLAR DYNAMOS. David Gubbins en *Reviews of Geophysics and Space Physics*, vol. 12, n.º 2, págs. 137-154; mayo, 1974.

THE EARTH'S CORE. J. A. Jacobs. Academic Press, 1975.

LABORATORY SIMULATION OF THERMAL CONVECTION IN ROTATING PLANETS AND STARS. F. H. Busse y C. R. Carrigan en *Science*, vol. 191, n.º 4222, págs. 81-83; 9 de enero de 1976.

MAGNETOHYDRODYNAMICS OF THE EARTH'S DYNAMO. F. H. Busse en *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 10, págs. 435-462; 1978.

LA INFLUENCIA DEL ESTETOSCOPIO EN EL DESARROLLO DE LA MEDICINA

IN DEFENSE OF THE STETHOSCOPE. James B. Herrick en *Annals of Internal Medicine*, vol. 4, n.º 2, págs. 113-116; agosto, 1930.

DISCUSSION ON THE STETHOSCOPE VERSUS X-RAYS. James Maxwell, Peter Kerley y L. G. Blair en *Proceedings of the Royal Society of Medicine*, vol. 39, págs. 355-357; 1946.

JUEGOS MATEMATICOS

THE SIEVE OF ERATOSTHENES AND THE MÖBIUS STRIP. H. T. McAdams en *The American Mathematical Monthly*, vol. 55, n.º 5, págs. 308-309; mayo, 1948.

TILING WITH INCOMPARABLE RECTANGLES. Edward M. Reingold, Andrew C.C. Yao y Bill Sands en *Journal of Recreational Mathematics*, vol. 8, n.º 2. págs. 112-119; 1975-76.

TALLER Y LABORATORIO

STRESSES IN FREELY FALLING CHIMNEYS AND COLUMNS. Francis P. Bundy en *Journal of Applied Physics*, vol. 11, n.º 2, págs. 112-123; febrero, 1940.

THEORY OF THE CHIMNEY BREAKING WHILE FALLING. Ernest L. Madsen en *American Journal of Physics*, vol. 45, n.º 2, págs. 182-184; febrero 1977.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LA METASTASIS EN EL CANCER, por Garth L. Nicolson
Es la metástasis, y no el tumor primario, lo que generalmente supone la amenaza del cáncer. Al parecer, solamente algunas células muy malignas poseen las características que las habilitan para viajar por el cuerpo y establecer nuevos tumores.

EL ESPECTRO DEL HIDROGENO ATOMICO, por Theodor W. Hänsch, Arthur L. Schawlow y George W. Series
Durante casi un siglo, la luz emitida por los átomos más sencillos ha sido la base experimental más importante de las teorías sobre la estructura de la materia. Con la ayuda de los láser se continúa explorando el espectro del hidrógeno.

LA PERCEPCION DE LOS BLANCOS Y NEGROS DE LAS SUPERFICIES, por Alan L. Gilchrist
El tono gris con que aparece una superficie está relacionado con la distribución de las luces y sombras que se perciben en ella, dependiendo a su vez de la relación entre la superficie y el espacio que la circunda cuando ambos son percibidos.

CANALES IONICOS EN LA MEMBRANA DE LA CELULA NERVIOSA, por Richard D. Keynes
El impulso nervioso se genera por el flujo de iones sodio y potasio a través de canales moleculares incrustados en la membrana de la célula nerviosa.

OBJETOS APOLO, por George W. Wetherill
Son cuerpos asteroides cuyas órbitas cortan a la órbita terrestre. Se conocen ahora unos 30 de ellos. Pueden ser núcleos de cometas que han perdido sus componentes volátiles.

DELFINES, por Bernd Würsig
Estos descendientes de mamíferos terrestres que se adaptaron al mar tienen un cerebro grande, aprenden rápidamente y exhiben un rico repertorio vocal. Pero la falta de pruebas deja en suspenso la cuestión de hasta qué punto son inteligentes.

CATAPULTAS ANTIGUAS, por Werner Soedel y Vernard Foley
La documentación griega y latina conservada revela el nivel notable de habilidad matemática y tecnológica que implicaba el desarrollo de estas primitivas plataformas de lanzamiento de misiles balísticos.

INMUNOHISTOQUIMICA EN MICROSCOPIA ELECTRONICA, por Antonio Martínez Hernández
Dentro del complejo laberinto estructural que es una célula, ¿cómo descubrir dónde se encuentra una determinada substancia?

